

UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

**MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'UNIVERSITÉ DU QUÉBEC À TROIS RIVIÈRES**

**COMME EXIGENCE PARTIELLE
DE LA MAÎTRISE EN SCIENCES DE L'ENVIRONNEMENT**

PAR

Safia BENSEGHIR

**ANALYSE DES FACTEURS DE VARIABILITÉ TEMPORELLE DES
DÉBITS AU QUÉBEC MÉRIDIONAL**

Janvier 2005

Université du Québec à Trois-Rivières

Service de la bibliothèque

Avertissement

L'auteur de ce mémoire ou de cette thèse a autorisé l'Université du Québec à Trois-Rivières à diffuser, à des fins non lucratives, une copie de son mémoire ou de sa thèse.

Cette diffusion n'entraîne pas une renonciation de la part de l'auteur à ses droits de propriété intellectuelle, incluant le droit d'auteur, sur ce mémoire ou cette thèse. Notamment, la reproduction ou la publication de la totalité ou d'une partie importante de ce mémoire ou de cette thèse requiert son autorisation.

TABLE DES MATIÈRES

I. REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'ANALYSE DES SÉRIES DES DÉBITS AU QUÉBEC.....	4
I.1. LA PRÉVISION DES DÉBITS	4
I.2. ANALYSE D'IMPACTS DES CHANGEMENTS CLIMATIQUES SUR LES SÉRIES CHRONOLOGIQUES	5
I.3. ANALYSE DES FACTEURS DE VARIABILITÉ SPATIO-TEMPORELLE DES DÉBITS AU QUÉBEC	6
II. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET D'ÉTUDE.....	6
III. MÉTHODES D'ÉTUDES	7
III.1. SOURCE DES DONNÉES ET CHOIX DES STATIONS	7
III.1.1 <i>L'Oscillation australe et Le Phénomène El Niño</i>	10
III.1.2 <i>L'Oscillation nord atlantique (ONA)</i>	10
III.1.3 <i>L'oscillation nord pacifique (ONP)</i>	11
III.2 VARIABLES À ANALYSER ET TRANSFORMATION DES VARIABLES	11
III.3 MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DES DONNÉES.....	12
III.3.1. <i>LES CORRÉLATIONS CROISÉES</i>	12
III.3.2. <i>ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES</i>	12
III.3.3. <i>ANALYSE SPECTRALE</i>	13
IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION.....	14
IV.1 CORRÉLATIONS SIMPLES CROISÉES.....	14
IV. 2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP).....	14
III.3 L'ANALYSE SPECTRALE.....	19
III.3.1. <i>Analyse spectrale des débits aux échelles annuelles et mensuelles</i>	19
III.3.2 <i>Analyse spectrale des notes factorielles</i>	23
V. CONCLUSION	33
VI. BIBLIOGRAPHIE	34

TABLEAUX ET FIGURES

Tableau 1. Caractéristiques des rivières analysées.....	9
Tableau 2. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990). Échelle annuelle.	16
Tableau 3. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1970-1990). Échelle saisonnière (printemps).	17
Tableau 4. Corrélations croisées entre les trois premières composantes principales et les indices climatiques annuels pour la période 1934-1990.....	18
Tableau 5. Corrélations croisées entre les composantes principales et les indices climatiques saisonniers (1934-1990).	18
Tableau 6. Périodes (années) des différentes fréquences détectées à l'échelle annuelle.	22
Tableau 7. Périodes (mois) des différentes fréquences détectées à l'échelle mensuelle.....	23
Tableau 8. Périodes (ans) des différentes fréquences détectées sur les composantes principales.	25
Tableau 9. Relation entre fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques associés.	32
Figure 1 Localisation des stations analysées.....	8
Figure 2 Analyse spectrale d'une rivière de la rive Sud à l'échelle annuelle.	20
Figure 3 Analyse spectrale d'une rivière de la rive Nord à l'échelle mensuelle.....	21
Figure 4a Analyse spectrale de la composante I à l'échelle annuelle.	26
Figure 4b Analyse spectrale de la composante II à l'échelle annuelle.....	27
Figure 4c. Analyse spectrale de la composante III à l'échelle annuelle.....	28
Figure 5a. Analyse spectrale de la composante I à l'échelle saisonnière.....	29
Figure 5b. Analyse spectrale de la composante II à l'échelle saisonnière.	30
Figure 5c. Analyse spectrale de la composante III à l'échelle saisonnière.	31

I. REVUE DE LITTÉRATURE SUR L'ANALYSE DES SÉRIES DES DÉBITS AU QUÉBEC

Dans cette revue de littérature, nous nous limiterons seulement à la province du Québec car les travaux qui sont entrepris sur l'analyse des débits s'inscrivent dans la tendance de la recherche internationale. De plus, dans certains domaines particuliers, des avancées scientifiques ont été réalisées surtout au Québec. C'est le cas notamment des méthodes de régionalisation.

La recherche relative à l'analyse des débits au Québec peut être groupée en trois axes majeurs :

- La prévision des débits.
- L'analyse d'impacts des changements climatiques sur les débits.
- Les facteurs de variabilité spatio-temporelle des débits.

I.1. La prévision des débits

La prévision des débits a été et restera toujours au centre des préoccupations de nombreux chercheurs au Québec. Cet engouement se justifie par la présence de nombreux cours d'eau qui rend impossible le jaugeage de toutes les rivières. Pour maximiser l'information tant en ce qui concerne la qualité et la quantité, de nombreux chercheurs, en particulier les ingénieurs hydrologiques et les statisticiens, se sont investis à mettre au point des méthodes mathématiques qui permettent d'estimer ou d'améliorer la qualité d'estimation des débits à une station jaugee ou à une station insuffisamment jaugee ou non jaugee. Il va sans dire que les débits analysés sont les débits extrêmes, et plus particulièrement les débits de crues en raison de leur importance dans la conception, la construction et la gestion des ouvrages hydrauliques, la prévention des inondations et la gestion des réservoirs (Ouarda et al., 1999). Il est en effet important d'estimer adéquatement des événements hydrologiques extrêmes en raison des risques importants associés à une connaissance insuffisante de ces événements. En effet, le tiers des ruptures de barrages par exemple est imputable aux submersions des structures causées entre autres par une sous-estimation des débits de conception. La recherche dans ce domaine peut être subdivisée en deux grandes périodes : la période avant et après 1980.

Avant 1980, les travaux étaient essentiellement orientés à la recherche d'une loi statistique adéquate pour décrire les séries des débits (annuelles et partielles) avec comme implication la recherche des meilleures méthodes d'estimation des paramètres des lois ainsi que des quantiles (Ashkar et Rousselle, 1981, Bobée, 1973, 1975; Bobée et Morin, 1973a, 1973b; Bobée et Robitaille, 1975, 1977; El-Jabi et al., 1986; Hoang, 1977, 1978). Il ressort de ces travaux que les lois qui décrivent mieux la distribution des débits de crues au Québec sont les lois de log-Pearson III, Gumbel et de Jenkinson.

L'estimation des débits à une station jaugee ne permet pas d'extrapoler les valeurs estimées à des stations non jaugees. Pour atteindre cet objectif, il fallait procéder par une estimation régionale. Bien qu'utilisée déjà au Québec dès 1982 par

Desforbes et Tremblay (1982), la méthode de régionalisation en vue de l'estimation des débits n'y a pris son essor que durant la décennie 90. Cet essor s'explique en grande partie par la rationalisation des stations de jaugeage consécutives à des réductions budgétaires intervenues au début de la décennie 90 (Ouarda et al., 1999a). La problématique de la régionalisation des débits se résume en la résolution de deux problèmes suivants (Ancil et Mathevet, 2004; Ancil et al., 1998; 2000; Cavadias, 1990; Daviau et al., 2000; Gingras et al., 1994; Grehys, 1996a, 1996b; Ribeiro-Corréa et al., 1995) :

- Le choix de la meilleure méthode de régionalisation pour regrouper les stations en régions hydrologiques homogènes, c'est-à-dire les régions qui réagissent hydrologiquement de la même façon aux sollicitations extérieures.
- Le choix de la loi statistique régionalisée la plus adéquate pour estimer les débits à des stations partiellement jaugées ou non jaugées.

En ce qui concerne les méthodes de régionalisation, la méthode de « Bootstrap » et la méthode bayésienne empirique se sont révélées comme les meilleures (Grehys, 1996a). Quant aux lois statistiques d'ajustement, la loi des valeurs extrêmes généralisées de Jenkinson (GEV) a été retenue (Grehys, 1996b).

Par ailleurs, l'estimation des débits a été aussi effectuée par des modèles hydrologiques. Contrairement à l'approche statistique utilisée dans les travaux précédents, les modèles hydrologiques font intervenir les facteurs physiques qui influencent les écoulements. Ainsi, il devient possible de reconstituer toute la chronique journalière des débits au lieu de se limiter seulement à une valeur ponctuelle. Ces travaux de modélisation ont abouti à l'élaboration de plusieurs modèles hydrologiques par les chercheurs de l'INRS-EAU notamment (Villeneuve et al., 1998).

1.2. Analyse d'impacts des changements climatiques sur les séries chronologiques

Lorsque le réchauffement climatique est devenu une réalité, de nombreux pays se sont donnés comme mission d'accroître les connaissances sur ce phénomène et d'élaborer des mesures d'adaptation et d'atténuation afin de faire face aux changements qui découleront de la hausse de la température de la planète. C'est dans ce contexte que de nombreux hydrologues au Québec se sont intéressés à l'analyse d'impacts des changements climatiques sur les ressources hydriques. Deux approches furent utilisées.

- La première approche s'est intéressée à détecter les impacts éventuels du réchauffement sur la variabilité inter-annuelle des débits. De nombreuses méthodes statistiques pour détecter les changements des propriétés statistiques des séries hydrologiques furent développées (Anderson et al., 1992 ; Ashfield et al., 1992 ; Burn et al., 2001 ; Gaudet et al., 2001 ; Harvey et Kowalchuk, 1992 ; Ouarda et al., 1999a ; Yue et al., 2001 ; Zhang et al., 2001). Les conclusions de ces études furent mitigées car les résultats dépendaient en grande partie des méthodes utilisées. Toutefois, on peut retenir de ces études que les changements induits par le réchauffement climatique se traduisent par la fonte précoce de la glace dans certaines rivières situées au sud du Québec (Burn et al., 2001). D'autres auteurs ont détecté les ruptures des moyennes

et/ou des variances sur quelques chroniques des débits (Ouarda et al., 1999). La plupart de ces ruptures sont survenues vers 1970.

- La seconde approche s'est intéressée à prévoir les changements qui surviendront dans les prochains décennies et siècles au moyen des modèles climatiques de circulation atmosphérique générale. C'est dans ce contexte qu'est né le consortium OURANOS dont une des missions est de modéliser les impacts éventuels des changements climatiques sur les ressources hydriques notamment. Dans cette perspective, au moyen du modèle climatique de circulation générale canadien, Roy et al. (2001) prévoient une hausse de l'intensité des fortes crues estivales et automnales de la rivière Chaudière tout au long du 21^{ème} siècle. Par ailleurs, Coulibaly et al. (2000) ont prédit les écoulements à partir de la production de l'énergie électrique au moyen des réseaux de neurones.

I.3. Analyse des facteurs de variabilité spatio-temporelle des débits au Québec

Contrairement aux deux premiers axes, les études portant sur les facteurs de la variabilité spatio-temporelle des débits sont quasi inexistantes. La seule étude publiée sur le sujet vient de paraître cette année (Ancil et Coulibaly, 2004). Celle-ci s'est intéressée à l'analyse de l'influence de modes de basses fréquences (oscillation australe, oscillation nord atlantique, oscillation nord pacifique, les températures de surface océanique et l'indice Ile de Baffin- Ouest Atlantique) sur la variabilité inter-annuelle des débits moyens annuels au Québec méridional. Shabbar et al. (1997) avaient déjà mis en évidence la corrélation entre l'oscillation australe et les précipitations dans certaines stations dans la partie méridionale du Québec.

II. PROBLÉMATIQUE ET OBJECTIFS DU PROJET D'ÉTUDE

La revue de littérature révèle que l'analyse des facteurs de la variabilité spatio-temporelle n'a guère suscité d'intérêt au Québec. Pourtant, sur le plan scientifique, il est très important de déterminer ces facteurs pour une meilleure gestion des ressources hydriques et pour une meilleure prévision des impacts d'origine climatique ou anthropique sur ces ressources. Pour combler cette lacune, le professeur Ali Assani a élaboré un programme de recherche qui vise à cerner tous les facteurs qui influencent la variabilité spatio-temporelle des débits au Québec. Ce programme est subdivisé en deux sous-programmes suivants :

- Les facteurs de la variabilité temporelle des débits aux échelles annuelle et mensuelles.
- Les facteurs de la variabilité spatiale des débits aux échelles annuelles, mensuelles et journalières. Les résultats obtenus dans le cadre de ce sous-programme sont publiés ou en voie de l'être (Assani et Tardif, 2004, Assani et al., 2004, Tardif et Assani, 2004; Tardif et al., 2004).

Notre projet de recherche s'inscrit dans le premier sous-programme. Il convient de préciser que lorsque nous avons entrepris ce projet de recherche, il n'existait aucune étude portant sur les facteurs de variabilité temporelle des débits au Québec. L'étude d'Ancil et Coulibaly (2004) est la seule étude consacrée jusqu'à présent à ce sujet.

Néanmoins, elle n'a pas répondu à toutes les interrogations sur ces facteurs. Rappelons que ces auteurs se sont intéressés uniquement aux modes de basses fréquences. Par conséquent leur étude ne pouvait pas détecter la présence des modes de hautes fréquences qui influencent aussi la variabilité inter-annuelle des débits (Smith et al., 1998). D'autre part, ces auteurs ont défini deux régions hydrologiques homogènes (est-ouest) caractérisées par la même variabilité inter-annuelle des débits. Mais ces deux régions ne reflètent pas l'influence maritime au Québec comme ils l'avaient soutenu dans leur étude.

En conclusion, l'étude d'Ancil et Coulibaly (2004) ne permet de détecter tous les facteurs qui influencent la variabilité temporelle des débits au Québec en raison de l'utilisation d'une seule méthode et d'une seule échelle (annuelle) d'analyse. Il est donc nécessaire d'utiliser plusieurs méthodes et échelles d'analyse afin de cerner tous les facteurs qui influencent la variabilité temporelle des débits au Québec. Par ailleurs en ce qui concerne la régionalisation, cette étude suscite plusieurs interrogations. La première concerne l'attribution du caractère « maritime » à certaines stations situées dans la partie méridionale de la rive sud. La seconde porte sur l'absence de l'influence de la latitude sur ce découpage. Pourtant, cette influence latitudinale est très prépondérante sur la variabilité spatiale des caractéristiques des débits (Tardif et al., 2004 ; Tardif et Assani, 2004). Enfin, la troisième concerne le lien entre les deux régions hydrologiques homogènes et la trajectoire des vents dominants qui soufflent au-dessus du Québec (Lutgens et Tarbuck, 1998; Sheridan, 2002).

À la lumière de ces considérations, notre recherche poursuit les deux objectifs suivants :

1. Déterminer les régions hydrologiques homogènes en fonction de la variabilité inter-annuelle des débits dans le Québec méridional.
2. Détecter les différents facteurs qui influencent les facteurs de la variabilité temporelle des débits en utilisant trois approches complémentaires (corrélations croisées, analyse en composantes principales et analyse spectrale) et en considérant trois échelles d'analyse, à savoir les échelles annuelles, saisonnières et mensuelles.

III. MÉTHODES D'ÉTUDES

III.1. SOURCE DES DONNÉES ET CHOIX DES STATIONS

En ce qui concerne les débits, les données des débits analysées sont publiées dans le Sommaire chronologique de l'écoulement au Québec édité par Environnement Canada (1992). Dans ce sommaire, y figurent le numéro fédéral canadien et le nom de la station, les débits moyens annuels et mensuels pour les années de mesure disponibles. Il est précisé si les valeurs des débits ont été corrigées en tenant compte de l'effet de glace. Sont aussi publiées les données sur la surface du bassin versant à l'endroit de la station de mesure, les coordonnées géographiques (latitude et longitude) et le nom du gestionnaire de la station ainsi que l'état (naturel ou régularisé) du cours d'eau. Il convient de préciser que le mot « régularisé » a été utilisé dans son sens le plus large, c'est-à-dire toute modification du cours d'eau d'origine anthropique. Il peut

ainsi s'agir d'un simple seuil déversant ou d'un endiguement des berges destiné à contenir l'eau dans le chenal principal. Afin d'appliquer les méthodes statistiques de manière rigoureuse, nous avons retenu seulement les stations de rivières naturelles ou faiblement régularisées dont l'écoulement n'est pas significativement influencé par les activités anthropiques. Au total, nous avons analysé 17 stations qui sont situées toutes dans le bassin versant du fleuve Saint-Laurent (673 000 km²). Elles sont présentées à la figure 1 et au tableau 1. Le choix de ces stations s'explique aussi par l'exigence de l'analyse spectrale qui ne peut s'appliquer efficacement que sur des séries d'au moins 50 données. Par ailleurs, parmi les 17 stations, 12 ont été analysées par Ancitil et Coulibaly (2004). Ce qui permet une meilleure comparaison des résultats.

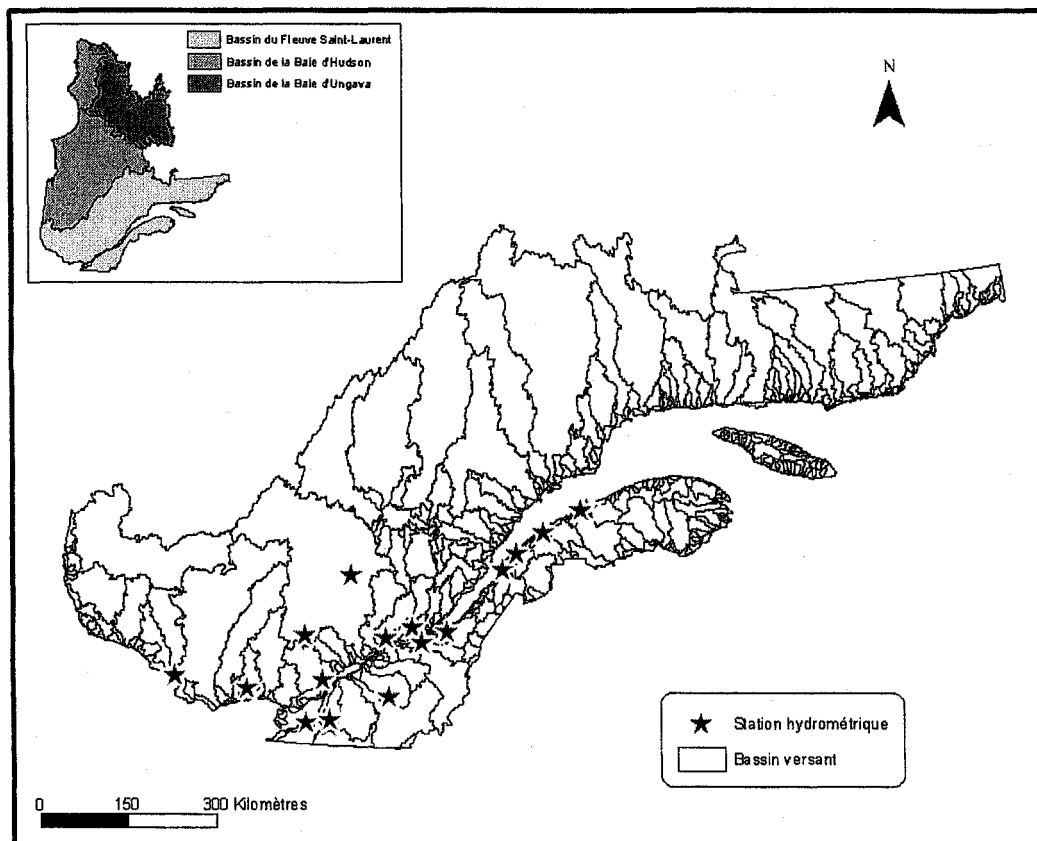


Figure 1 Localisation des stations analysées.

Tableau 1. Caractéristiques des rivières analysées.

Rivières	N° fédéral de station	Superficie en km ²	Années de mesure
Beaurivage	02PJ007	709	1925-1990
Blanche	02QB003/02QB005	208	1933-1990
Chateauguay	02QA001/02QA054	2460	1920-1990
Coulonge	02KG001	5150	1926-1990*
Jacques-Cartier	02PC002	2010	1924-1990
L'assomption	02OB002/02OB008	1340	1921-1990
Loup	02PG010/02PG001	1050	1923-1990*
Matane	02QB001	1650	1926-1990
Matawin	02NF003	1390	1931-1990
Nicolet SW	02OD001	544	1929-1990
Petite Nation	02LD002/02LD005	1300	1925-1990*
Richelieu	02OJ001/02OJ007	22000	1924-1990
Rimouski	02QA010/02QA002	1610	1923-1990*
Sainte-Anne	02PB002	1800	1919-1990
Sud	02PH001/02PH010	826	1923-1990*
Trois pistoles	02QA001	932	1923-1990
Vermillon	02ND001	2670	1928-1984

* La station a été déplacée.

En ce qui concerne les données de trois indices climatiques analysées, elles ont été tirées de l'internet aux adresses suivantes :

<http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml> pour l'oscillation australe.

<http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat.other.html> pour l'oscillation nord atlantique.

http://tao.atmos.washington.edu/data_sets/pna/ pour l'oscillation nord pacifique.

Ces trois indices ont été déjà décrits dans notre document présenté lors du séminaire I. Nous allons les décrire sommairement. Précisons que ces trois indices sont les plus utilisés pour analyser la variabilité temporelle des éléments climatiques et des débits en Amérique du nord (Anctil et Coulibaly, 2004; Coulibaly et al., 2000; Sheridan, 2003). De plus, leurs données sont facilement accessibles. C'est pour cette raison que nous les avons choisis. Nous les allons les décrire de manière succincte.

III.1.1 L'Oscillation australe et Le Phénomène El Niño

Le phénomène El Niño/oscillation australe est constitué de deux phénomènes distincts mais liés : El Niño et l'oscillation australe. Le premier phénomène est un phénomène océanique alors que le second est un phénomène atmosphérique.

À l'origine, le terme El Niño (ou El corriente d'El Niño) désignait un courant côtier chaud présent le long des côtes du Pérou et du Chili au mois de décembre vers Noël (d'où El Niño = L'enfant Jésus) et qui apportait des poissons « miraculeux » aux formes et couleurs inhabituelles dans ces régions aux eaux côtières plutôt froides. Tous les deux à sept ans, ce courant chaud persistait plusieurs mois avec pour conséquence la rupture de la chaîne alimentaire côtière et la mort ou la migration de nombreuses espèces de poissons. De nos jours, El Niño est considéré comme le second facteur qui influence le climat du monde, après le cycle des saisons. En fait, il s'agit d'un déplacement des eaux chaudes du Pacifique occidental (Indonésie) vers le Pacifique oriental (les côtes de l'Amérique du sud) et par une diminution de la force des alizés. Ses effets affecteraient la planète entière. Quant à l'indice de l'oscillation australe, il exprime la différence de pression au dessus du bassin Pacifique entre Tahiti (à l'est) et Darwin (à l'ouest). La forte corrélation qui existe entre El Niño et l'oscillation australe amène les chercheurs à utiliser aussi bien le terme « El Niño » que l'abréviation ENSO (El Niño Southern Oscillation) pour parler du même phénomène. Il correspond à un déséquilibre du couplage océan-atmosphère provoqué par une inversion brutale des vents équatoriaux. L'indice est négatif pendant la période d'El Niño et positif pendant la période de la Niña. Celle-ci correspond à un renforcement des alizés (correspondant à une valeur positive de l'indice de l'oscillation australe) qui déplace le réservoir d'eau chaude plus à l'ouest que la position qu'il occupe dans les conditions normales, apportant des pluies abondantes sur l'Indonésie. La remontée des eaux froides à l'est provoque alors des sécheresses sur les côtes ouest sud-américaines.

III.1.2 L'Oscillation nord atlantique (ONA)

L'oscillation nord atlantique est définie par la variation de la pression atmosphérique au-dessus du bassin nord atlantique. Il est exprimé par un indice fondé sur la différence de pressions entre le sud (Péninsule Ibérique) et le nord (Islande) du bassin atlantique nord. En pratique, on considère les pressions mesurées à la station de Ponta Delgada (Açores) et à Stykkisholmur ou à Reykjavik (Islande). Les causes climatiques de cette oscillation ne sont pas encore élucidées. Mais selon Leroux (2000), cette variabilité de pression dans l'Atlantique nord est liée aux activités des anticyclones mobiles polaires qui sont des cellules de masses d'air froid qui descendent du pôle nord. Les conséquences climatiques de cette oscillation ont surtout été analysées sur le

continent européen bien que leur impact sur le temps en Amérique du nord a été reconnu (Sheridan, 2003). Ainsi, des indices positifs (Phase Haute) de cette oscillation se traduisent par de forts vents soufflant de l'océan Atlantique vers le continent européen. Le climat y est alors sous influence océanique. En Phase basse (indice négatif), les deux centres sont affaiblis, les vents d'ouest le sont aussi et l'Europe subit les rigueurs du climat continental, particulièrement en hiver (Wanner, 1999). L'influence de cette oscillation s'étendrait même en hémisphère sud (Poveda et Mesa, 1996).

III.1.3 L'oscillation nord pacifique (ONP)

L'oscillation nord pacifique est un indice qui dérive de la circulation de la troposphère moyenne. Elle résulte de l'interaction de quatre centres d'action au-dessus du Pacifique nord et du continent nord-américain : le premier centre est situé près d'Hawaï, le second sur l'Alberta, le troisième sur les Aléoutiennes et le dernier sur la Floride. Ces quatre centres sont liés deux à deux entre eux. Les anomalies de pression sont des mêmes signes en Hawaï et en Alberta d'une part, et en Aléoutiennes et en Floride d'autre part. Si les anomalies de pression sont négatives dans les deux premiers centres, elles sont positives dans les deux derniers centres. Les valeurs positives de l'indice ONP correspondent aux anomalies positives de pression aux centres Hawaï-Alberta mais négative aux deux autres centres. Cette situation se traduit par une forte circulation atmosphérique dans la partie méridionale du continent nord-américain. En revanche, un indice négatif correspond à une circulation plus zonale au-dessus du continent américain (Sheridan, 2003).

III.2 VARIABLES À ANALYSER ET TRANSFORMATION DES VARIABLES

En ce qui concerne les variables indépendantes (les indices climatiques), les données qui sont publiées sont des données mensuelles déjà standardisées. La standardisation consiste à retrancher à chaque terme de la série la moyenne, cette différence est ensuite divisée par l'écart type de la série. Nous avons regroupé les mois en 4 saisons. La série des indices d'oscillation australe remonte à l'année 1876, celle d'indices d'oscillation nord atlantique à l'année 1865 et enfin, celle des indices d'oscillation nord pacifique à l'année 1948.

Quant à la variable dépendante (les débits), nous avons analysé trois types de variables :

- Les débits mensuels. La moyenne des débits journaliers pour le mois considéré.
- Les débits saisonniers. La moyenne des débits mensuels d'une saison. Étant donné qu'au Québec les précipitations sont très abondantes en hiver et tombent sous forme de neige, il faut attendre le printemps pour que cette neige fonde, on s'est donc focalisé sur les débits printaniers exclusivement, période pendant laquelle la neige accumulée se transforme en écoulement.
- Les débits annuels qui sont la moyenne des débits mensuels moyens.

Dans ce travail nous avons considéré que l'année hydrologique commence en octobre et se termine en septembre de l'année civile suivante.

III.3 MÉTHODES STATISTIQUES D'ANALYSE DES DONNÉES

III.3.1. LES CORRÉLATIONS CROISÉES.

La méthode de corrélations simples croisées consiste à calculer les corrélations linéaires entre la variable dépendante (le débit) et les variables indépendantes (les indices climatiques) sur plusieurs pas de temps. L'utilisation de cette technique se justifie par le fait que l'influence de ces différents indices climatiques sur les débits de rivières peut ou ne pas se manifester le même mois et/ou la même saison de leur occurrence. Cette influence peut être ressentie la même année ou plusieurs années après l'apparition du phénomène. Les corrélations ont été calculées aux échelles annuelles et saisonnières.

Échelle annuelle :

Débits (i) vs Indices_j(i-k); k=0,..., 7 ans.

i= année courante

j= 1, 2, 3 (OA, ONP, ONA)

Échelle saisonnière

Débits_p (i) vs Indices_j j=1, 2, 3. p : Printemps

Les saisons des indices sont les suivantes :

- Printemps(i) : Avril(i), Mai(i), Juin(i)
- Hiver(i) : Janvier(i), Février(i), Mars(i)
- Automne(i-1) : Octobre(i-1), Novembre(i-1), Décembre(i-1)
- Été(i-1) : Juillet(i-1), Août(i-1), Septembre(i-1)
- Printemps(i-1) : Avril(i-1), Mai(i-1), Juin(i-1)
- Hiver(i-1) : Janvier(i-1), Février(i-1), Mars(i-1)

III.3.2. ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES

La méthode de corrélation analyse séparément les rivières. Ce qui pose souvent un problème d'interprétation sur la relation entre les indices climatiques et les rivières. Pour surmonter cette difficulté, il faut d'abord regrouper les rivières en fonction de leur variabilité inter-annuelle des débits. C'est l'étape de la régionalisation. Elle est réalisée à partir des valeurs de saturations des rivières sur les composantes principales significatives, obtenues après avoir appliqué la rotation varimax. Une composante principale est considérée comme significative lorsque sa valeur propre est supérieure ou égale à 1, critère le plus couramment utilisé dans la littérature. Ensuite, après le regroupement des rivières, on procède au calcul des coefficients des corrélation entre les notes factorielles des années sur chaque composante et les indices climatiques.

III.3.3. ANALYSE SPECTRALE

Elle consiste à appliquer une transformée de Fourier sur les séries de débits pour chaque échelle. Le modèle de Fourier décompose la série chronologique en une somme de composantes trigonométriques affectées de coefficients en fonction du temps.

Soit f une fonction périodique, de période $T = \frac{2\pi}{\omega}$ intégrable sur tout fermé de \mathbb{R} , on appelle série de Fourier de f , la série trigonométrique:

$$\sum_{n=0}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

Toute fonction périodique f , non sinusoïdale, continue sur tout intervalle $\Delta = [\alpha, \alpha+T]$ et dérivable sur cet intervalle, peut se décomposer en une somme infinie de fonctions sinusoïdales dont les fréquences sont des multiples de celle de la fonction f :

$$f(t) = A_0 + Y_1 \sin(\omega t - j_1) + Y_2 \sin(2\omega t - j_2) + \dots + Y_n \sin(n\omega t - j_n) + \dots$$

A_0 = Terme constant, valeur moyenne

$Y_1 \sin(\omega t - j_1)$ = terme fondamental (harmonique de rang 1).

$Y_2 \sin(2\omega t - j_2)$ = terme harmonique de rang 2.

$Y_n \sin(n\omega t - j_n)$ = terme harmonique de rang n .

Avec $Y_n \sin(n\omega t - j_n) = A_n \cos(n\omega t) + B_n \sin(n\omega t)$

La somme de chaque composante pour un temps t correspond à une amplitude qui correspond elle-même à une période. La fonction de Fourier permet de trouver parmi toutes les périodes de la série de débits considérée, les périodes qui expliquent le mieux la variance observée de la variable débit. Un retrait de la moyenne de la série, pour chaque donnée de débits, a été nécessaire et cela pour chaque échelle. En effet, la première somme des composantes trigonométriques, c'est-à-dire pour $t = 0$, correspond à la moyenne de la série A_0 . L'amplitude très grande de cette somme de composantes masquent les autres amplitudes, supprimer cette amplitude permet un réajustement des autres.

Il existe trois méthodes pour estimer la densité spectrale des fréquences. Chaque méthode présente des avantages et des inconvénients (Berger et al., 1991; Yiuo et al., 1996).

- La méthode de maximum d'entropie. Son avantage est de détecter très rapidement les pics spectraux présents sur une série chronologique et son pouvoir de résolution des fréquences est grand. Cependant, on ne peut pas tester la significativité des pics spectraux détectés.
- La méthode Blackman-Tukey. Son avantage est de tester statistiquement la significativité des pics spectraux estimés. Son désavantage est son faible pouvoir de résolution des fréquences.
- La méthode de « Thomson Multi-Taper ». C'est la méthode la plus performante car elle présente tous les avantages de deux autres méthodes sans leurs inconvénients. Toutefois, sa programmation est ardue.

Dans le cadre de ce travail, nous avons choisi la première méthode car elle est la plus utilisée en hydrologie (Kayser et al., 1991; Fleming et al., 2002) et répond parfaitement aux objectifs de ce travail, c'est-à-dire celui de déterminer les différents pics spectraux. Cette méthode a été appliquée aux chroniques des débits annuels et mensuels, d'une part, et aux notes factorielles des composantes principales, d'autre part. Les calculs ont été effectués au moyen du programme Matlab.

IV. RÉSULTATS ET DISCUSSION

L'analyse détaillée des résultats est présentée dans les deux articles qui accompagnent ce document. Pour éviter la répétition, ce dernier ne reprendra que les principaux résultats obtenus.

IV.1 CORRÉLATIONS SIMPLES CROISÉES

Nous n'avons pas obtenu des résultats concluants avec cette méthode. Ces résultats figurent à l'annexe I. Retenons tout simplement qu'il existe un lien significatif entre les indices climatiques et les débits de quelques rivières aux échelles annuelle et printanière. Ce lien significatif varie d'un indice à un autre et d'une rivière à une autre. Ce qui rend malaisée l'interprétation des coefficients de corrélation. Ceux-ci ne permettent pas d'établir de manière formelle l'existence d'un lien significatif entre les indices climatiques et les débits de rivières au Québec méridional.

IV. 2 ANALYSE EN COMPOSANTES PRINCIPALES (ACP)

Les valeurs de saturations des rivières sont consignées dans le tableau 2 pour les débits annuels et le tableau 3 pour les débits printaniers. Il ressort de ces tableaux que les rivières analysées peuvent être groupées en trois régions hydrologiques homogènes. À l'échelle annuelle, la première région, associée à la première composante principale, regroupe les stations situées dans la partie méridionale de la rive sud, la seconde composante, les rivières situées dans la partie septentrionale de la même rive et la troisième composante, les rivières de la rive nord. La quatrième composante ne représente qu'une seule rivière. La variance totale expliquée par les trois premières composantes est de l'ordre de 68%. À l'échelle saisonnière, on observe une interversion des régions hydrologiques associées aux composantes I et II. La composante I est associée aux rivières de la rive nord alors que la composante III l'est aux rivières de la rive sud situées dans la partie méridionale.

Quant à la relation entre les régions hydrologiques homogènes et les indices climatiques, les valeurs des coefficients calculées entre les deux types de variables sont consignées au tableau 4 (échelle annuelle). Ce tableau révèle un lien bijectif entre les trois indices climatiques et les trois régions hydrologiques homogènes. De fait, chaque indice climatiques est corrélé à une région hydrologique. L'oscillation australe est corrélée à la deuxième région hydrologique (composante II). Ce lien est décalé dans le temps. En effet, il est significatif après une année et trois années d'occurrence. Mais il convient de souligner que le signe de coefficients de corrélation change avec le pas de

temps. Il est négatif à l'année (-1) mais positif à l'année (-3). Quant à l'oscillation nord atlantique, elle est positivement corrélée à la première région hydrologique homogène durant l'année (-1). Enfin, l'oscillation nord pacifique est positivement corrélée à la région hydrologique III. À l'échelle saisonnière, on observe le même lien bijectif, à l'exception de l'oscillation nord pacifique qui n'est plus significativement corrélée à la région hydrologique III (tableau 5).

La principale conclusion qui se dégage de cette analyse des corrélations entre les indices climatiques et les débits mesurés dans les trois régions hydrologiques homogènes est que l'influence spatiale de chaque indice climatique s'étend seulement sur une partie de la zone étudiée. Ainsi, l'influence de l'oscillation nord Pacifique se limite seulement sur la rive nord et celle de l'oscillation australe dans la partie nord de la rive sud. Pour l'oscillation nord atlantique, son influence ne s'étend que sur la partie méridionale de cette dernière rive. Pour expliquer ce lien bijectif, il est important d'établir le lien entre les trois indices climatiques et les types de masses d'air au Québec d'une part, et la fréquence des vents, d'autre part.

En ce qui concerne le lien entre les indices climatiques et les masses d'air, il n'existe encore aucune étude disponible au Québec. Toutefois, à l'échelle de l'Amérique du nord, Sheridan (2003) a analysé ce lien. Mais on ne peut pas tirer meilleur parti de cette étude à l'échelle du Québec. Cet auteur a révélé notamment que dans la partie nord-orientale des Etats-Unis, proche du Québec, lorsque l'oscillation nord pacifique est en phase positive, cette région est soumise à une intrusion fréquente de l'air polaire mais une diminution significative de l'air tropical humide. Quant à l'oscillation nord atlantique, lorsque celle-ci est en phase positive, on observe un remplacement de l'air polaire humide par l'air polaire sec dans la partie nord-orientale du Canada.

Tableau 2. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990). Échelle annuelle.

Rivières	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.872	0.127	0.134	-0.177
Nicolet de sud-ouest	0.845	0.105	0.182	0.249
Chateaugay	0.841	0.215	0.069	-0.106
Beaurivage	0.835	0.279	0.295	0.097
Sud	0.784	0.329	0.215	0.097
L'Assomption	0.759	0.226	0.420	0.184
Matane	0.232	0.862	0.06	-0.001
Blanche	-0.169	0.850	-0.048	0.067
Rimouski	0.216	0.847	0.155	0.105
Trois-Pistoles	0.264	0.847	0.259	0.167
Loup	0.409	0.695	0.249	0.178
Coulonge	0.000	0.103	0.722	0.316
Petite Nation	0.393	0.144	0.713	-0.226
Matawin	0.328	0.325	0.676	-0.071
Vermillon	0.485	-0.009	0.669	0.026
Sainte-Anne	0.133	0.282	0.040	0.866
Jacques Cartier	0.423	0.367	0.145	-0.044
Valeurs propres	5.193	3.928	2.521	1.169
Variance totale expliquée cumulée (%)	30.5	58.7	72.6	83.7

Tableau 3. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1970-1990).
Échelle saisonnière (printemps).

Rivière	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.403	0.230	0.738	0.03
Nicolet de sud-ouest	0.148	0.085	0.863	0.197
Chateaugay	0.146	0.043	0.893	0.074
Beaurivage	0.331	0.272	0.792	0.169
Sud	0.350	0.420	0.725	0.132
L'Assomption	0.698	0.135	0.481	0.343
Matane	0.203	0.884	0.138	-0.107
Blanche	-0.169	0.845	0.021	0.316
Rimouski	0.209	0.845	0.119	0.034
Trois-Pistoles	0.252	0.808	0.303	0.155
Loup	0.461	0.633	0.374	0.159
Coulonge	0.534	0.042	0.045	0.633
Petite Nation	0.798	0.193	0.325	-0.083
Matawin	0.742	0.351	0.299	0.290
Vermillon	0.924	0.07	0.125	-0.125
Sainte-Anne	-0.058	0.233	0.382	0.773
Jacques Cartier	0.791	0.158	0.279	0.205
Valeurs propres	4.242	3.841	4.173	1.517
Variance totale expliquée				
cumulée (%)	25.0	47.6	72.1	81

Tableau 4. Corrélations croisées entre les trois premières composantes principales et les indices climatiques annuels pour la période 1934-1990.

Année	OA			ONA			ONP		
	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII
(0)	0.175	-0.061	0.066	0.227	-0.252	-0.117	-0.044	0.294	0.328
(-1)	0.089	-0.304	-0.187	0.277	-0.044	0.053	-0.155	0.089	-0.006
(-2)	0.133	0.111	-0.012	0.130	-0.205	-0.184	-0.172	-0.207	-0.015
(-3)	-0.002	0.327	-0.053	-0.131	0.142	-0.028	0.223	0.012	-0.079
(-4)	-0.011	0.083	0.080	-0.017	0.039	-0.188	-0.274	0.013	-0.061
(-5)	-0.003	-0.153	0.077	-0.245	-0.086	-0.123	-0.135	0.031	-0.064
(-6)	-0.151	0.069	-0.168	-0.082	-0.160	0.112	-0.032	-0.259	0.107

Les coefficients des corrélation significatifs au seuil de 5% sont soulignés en gras.

Tableau 5. Corrélations croisées entre les composantes principales et les indices climatiques saisonniers (1934-1990).

Saisons	OA			ONA			ONP		
	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII
P(0)	0.180	-0.028	0.111	-0.020	-0.155	0.244	0.031	0.099	-0.019
H(0)	0.013	-0.151	0.164	0.224	-0.082	-0.054	0.120	0.219	-0.059
A(-1)	0.059	-0.136	0.162	-0.009	-0.195	0.071	-0.261	0.223	-0.114
E(-1)	-0.031	-0.227	0.072	0.080	-0.140	0.241	-0.165	-0.025	-0.069
P(-1)	-0.097	-0.265	0.139	-0.213	-0.144	-0.160	0.068	0.100	0.225
H(-1)	-0.091	-0.150	-0.054	0.353	0.094	-0.019	0.012	-0.048	0.049

0 = indices climatiques saisonniers de la même année que les débits printaniers. (-1) : indices climatiques saisonniers de l'année précédente. Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 5% sont soulignées en gras.

Ces observations ne nous permettent pas d'établir un lien direct entre les indices climatiques et les types de masses d'air au Québec. Quant à la fréquence des vents, Lutgens et Tarbuck (1998) ont déterminé quatre directions principales dans la partie nord-orientale de l'Amérique du nord : la direction nord-ouest associée à l'air polaire continental, la direction sud-ouest associée à l'air tropical, la direction nord-est associée à l'air polaire océanique et enfin, la direction ouest, associée à l'air maritime continentalisé. Comme aucun lien n'a encore été établi entre ces différentes directions et les indices, il est difficile de tirer parti de ces données pour expliquer le lien bijectif observé entre les indices climatiques et les régions hydrologiques homogènes.

La méthode de corrélation linéaire présente deux inconvénients majeurs dans la recherche des facteurs de variabilité temporelle des débits :

- Elle suppose l'existence d'un lien linéaire entre les variables analysées. Ce qui n'est pas toujours le cas en hydrologie. Dans le cas qui nous concerne, on sait que le lien entre les débits et les indices climatiques n'est pas nécessairement linéaire (Coulibaly et al., 2000).
- Elle ne permet de détecter l'influence des autres facteurs explicatifs que ceux impliqués dans l'analyse.
- Les valeurs des coefficients de corrélation sont relativement faibles (< 0.400); ce qui présume l'influence des autres facteurs sur la variabilité inter-annuelle des débits.

Pour pallier ces deux faiblesses, nous avons opté pour l'analyse spectrale. Contrairement à l'analyse des ondelettes déjà utilisée par Anctil et Coulibaly (2004) au Québec méridional, l'analyse spectrale donne des résultats concluants même à l'échelle mensuelle et permet ainsi de détecter certains facteurs associés aux modes de haute fréquence dont l'influence ne se limite qu'à l'échelle saisonnière ou annuelle.

III.3 L'ANALYSE SPECTRALE

Rappelons que nous avons appliqué l'analyse spectrale sur les débits de chaque rivière aux échelles annuelle et mensuelle et sur les notes factorielles des composantes principales associées à chaque région hydrologique homogène.

III.3.1. Analyse spectrale des débits aux échelles annuelles et mensuelles

Les résultats sont consignés dans les tableaux 6 et 7. Les figures 2 et 3 illustrent quelques cas. Nous avons divisé les différents pics détectés en cinq bandes de fréquences. Nous avons détecté deux bandes de fréquences en fonction de leurs périodes. :

- Les Très Basses Fréquences (TBF) dont la période est supérieure à 20 ans.
- Les Moyennes Basses Fréquences (MBF) dont la période varie de 16 à 17 ans;
- Les Basses Fréquences (BF) caractérisées par une périodicité de 2 à 8 ans;
- Les Hautes fréquences (HF) de périodes comprise entre 6 et 12 mois;
- Enfin, les Très Hautes Fréquences (THF) caractérisées par des périodes comprises en 2 et 5 mois.

À l'échelle annuelle, nous avons détecté seulement deux types de basses fréquences : les TBF et les BF. Toutefois, les BF n'ont pas été détectées sur trois rivières (Nicolet du sud-ouest, Beaurivage et Matawin). La périodicité des THF varie entre 21 et 36 ans et celle des BF, entre 2 et 8 ans. A l'échelle mensuelle, les deux bandes de hautes fréquences (HF et THF) ont été détectées sur toutes les chroniques des débits. Quant aux bandes des faibles fréquences, elles n'ont été détectées que sur presque la moitié des chroniques des débits analysées (8 sur 17 rivières). Contrairement à l'échelle annuelle, la bande de moyenne basse fréquence (MBF) a été détectée sur deux rivières tout comme la bande de très haute fréquence (HBF). Celle-ci n'a été détectée que sur les rivières de la rive nord.

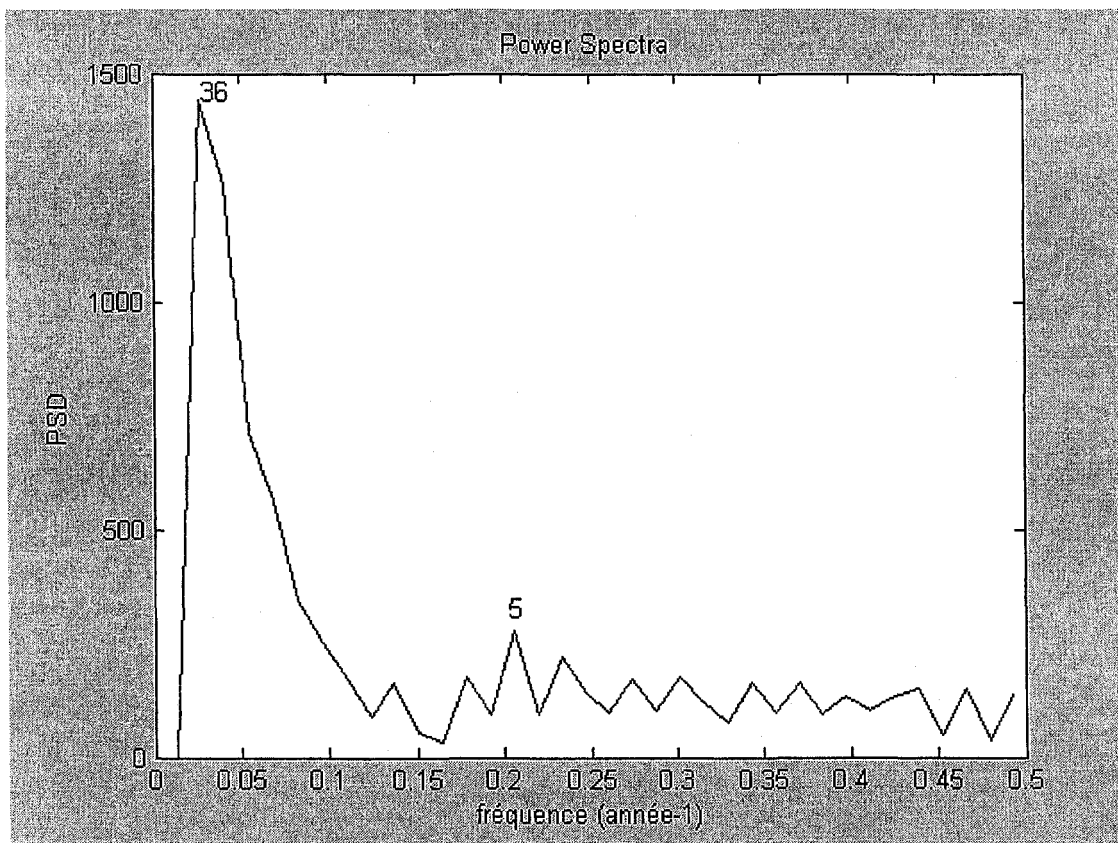


Figure 2 Analyse spectrale d'une rivière de la rive Sud à l'échelle annuelle.

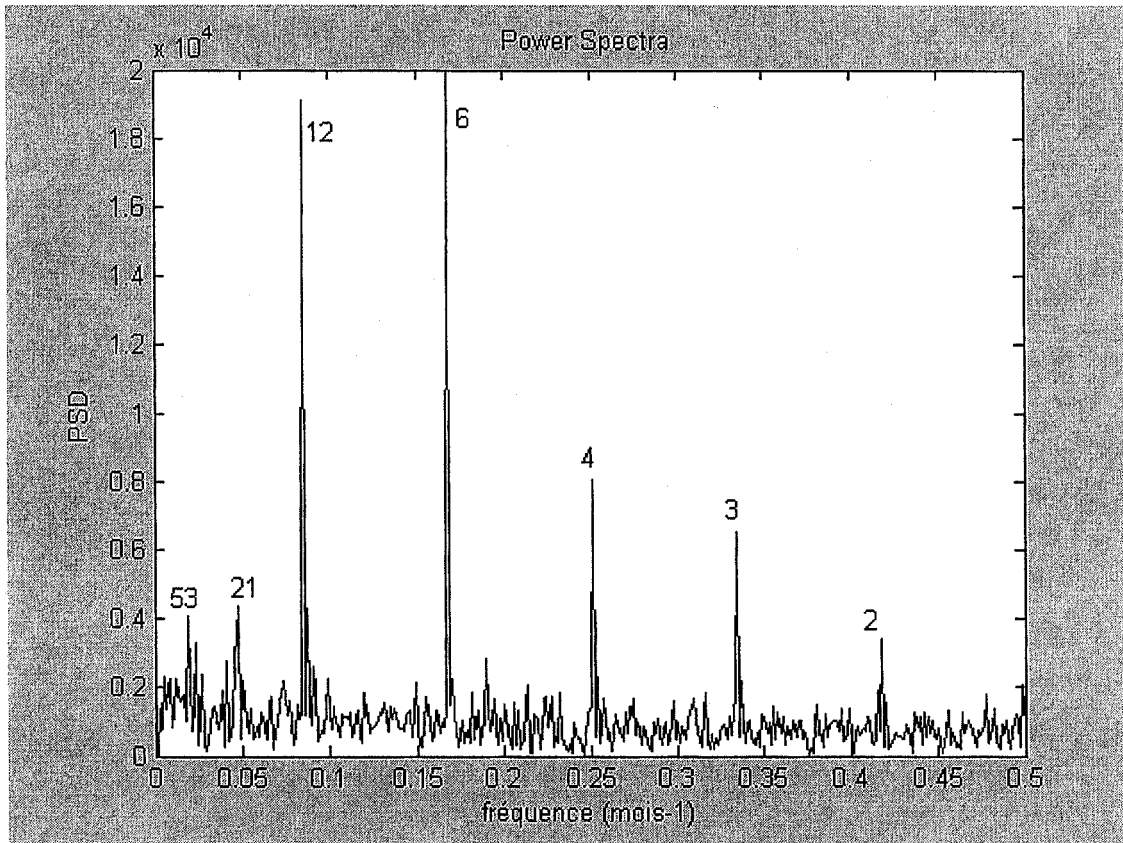


Figure 3 Analyse spectrale d'une rivière de la rive Nord à l'échelle mensuelle.

Tableau 6. Périodes (années) des différentes fréquences détectées à l'échelle annuelle.

Rivières	TBF	MBF	BF
Richelieu	36		6
Nicolet de sud-ouest	22		
Chateaugay	35		8
Beaurivage	24		
Sud	24		7
Matane	23		4
Blanche	21		6
Rimouski	25		4
Trois-Pistoles	25		7 et 4
Loup	22		7 et 4
Coulonge	34		4
Petite Nation	36		6
Matawin	22		
L'Assomption	25		5
Vermillon	34		5 et 2
Sainte-Anne	24		6 et 3
Jacques Cartier	36		5

Tableau 7. Périodes (mois) des différentes fréquences détectées à l'échelle mensuelle.

Rivières	TBF	MBF	BF	HF	THF
Richelieu		217	21	12 et 6	4, 3 et 2
Nicolet de sud-ouest				12 et 6	4, 3 et 2
Chateaugay			21	12 et 6	4, 3 et 2
Beaurivage		22		12 et 6	4, 3 et 2
Sud				12 et 6	4, 3 et 2
Matane				12 et 6	4, 3 et 2
Blanche				12 et 6	4, 3 et 2
Rimouski				12 et 6	4, 3 et 2
Trois-Pistoles				12 et 6	4, 3 et 2
Loup				12 et 6	4, 3 et 2
Coulonge			53 et 21	12 et 6	4, 3 et 2
Petite Nation	435		21 et 15	12 et 6	4, 3 et 2
Matawin			79 et 21	12 et 6	4, 3 et 2
L'Assomption				12 et 6	4, 3 et 2
Vermillon			30 et 21	12 et 6	4, 3 et 2
Sainte-Anne	427			12 et 6	4, 3 et 2
Jacques Cartier				12 et 6	4, 3 et 2

III.3.2 Analyse spectrale des notes factorielles

Les résultats de l'analyse spectrale sont présentés au tableau 8 et aux figures 4 et 5. Ils sont comparables à ceux décrits ci-dessus. Toutefois, à l'échelle saisonnière, on a détecté la présence des moyennes basses fréquences dont la période varie entre 16 et 17 ans dans les trois régions hydrologiques homogènes.

À la lumière de ces résultats, la variabilité inter-annuelle des débits dans le Québec méridional est caractérisée par une superposition des bandes de différentes fréquences appartenant à la fois aux basses et hautes fréquences. Toutefois, la présence des très basses fréquences sur les chroniques des débits est difficile à interpréter du fait que la longueur des séries analysées ne dépasse guère 60 ans. La détection de cette bande des fréquences nécessiterait en principe des séries de longueur supérieure ou égale à 100 ans (Pekarova et al., 2003). Le tableau 9 résume les relations entre les fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques associés. En ce qui concerne les basses fréquences, elles sont associées à plusieurs facteurs dont il est toujours difficile de cerner de manière précise l'influence de chacun. Leurs effets peuvent se conjuguer ou se neutraliser. Anctil et Coulibaly (2004) ont attribué la présence de cette fréquence à l'influence des indices OA et ONA. Quant aux signaux de moyennes basses fréquences, la périodicité associée au cycle solaire n'a pas été clairement identifiée sur les chroniques des débits. En revanche, celui associé au cycle lune-soleil l'a été sur les notes factorielles à l'échelle saisonnière. Les signaux de haute fréquence de périodicité supérieure à 6 mois sont généralement attribués au cycle saisonnier et annuel des débits, c'est-à-dire au mouvement de la terre autour du soleil (Smith et al. 1998). Mais les très hautes fréquences dont la période est inférieure à 6 mois sont difficiles à interpréter. Elles peuvent traduire des variations saisonnières subtiles à cerner comme les activités orageuses locales ou la fonte des neiges (Fleming et al. 2002; Smith et al. 1998). En ce qui concerne ce dernier facteur, Smith et al. (1998) l'ont associé aux THF de période de 4 mois détectées sur les chroniques des débits de rivières du nord-est des Etats-Unis caractérisées par un fort régime nival printanier comparable à celui des rivières du Québec.

Tableau 8. Périodes (ans) des différentes fréquences détectées sur les composantes principales.

Composantes Principales	TBF	MBF	BF
Échelle annuelle			
CP I	37		9, 4 et 3
CP II	26		4.5, 3.6, 3, 2.5 et 2
CP III	33		7, 5, 3 et 2
Échelle saisonnière (printemps)			
CP I	57	17	2
CP II	26	16	7, 5 et 4
CP III	32	17	10, 4, 3 et 2

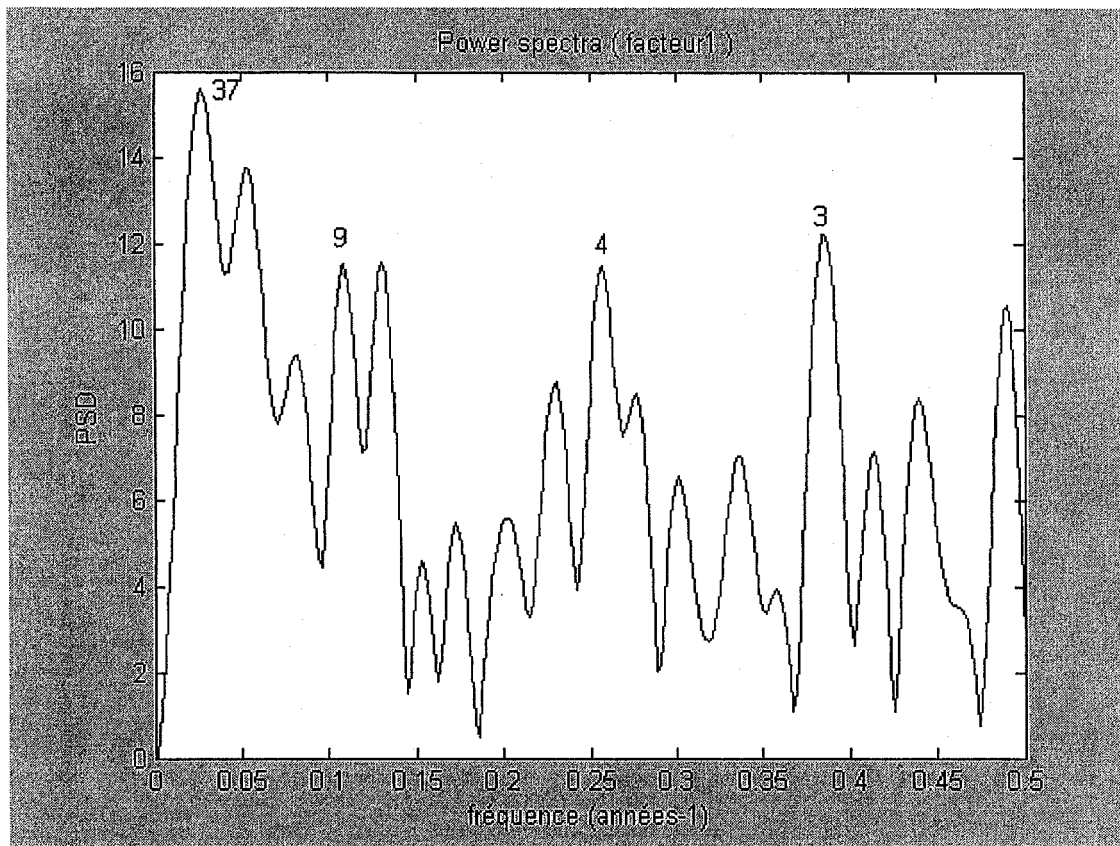


Figure 4a Analyse spectrale de la composante I à l'échelle annuelle.

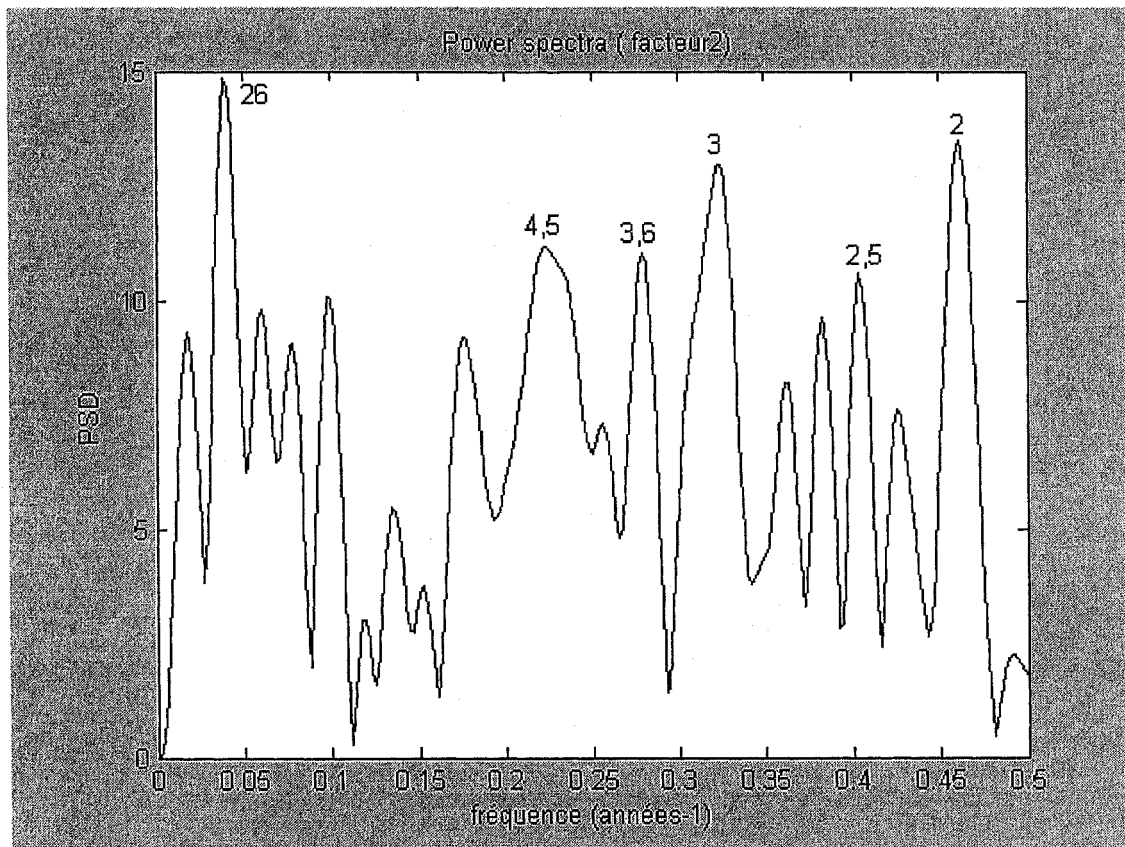


Figure 4b Analyse spectrale de la composante II à l'échelle annuelle.

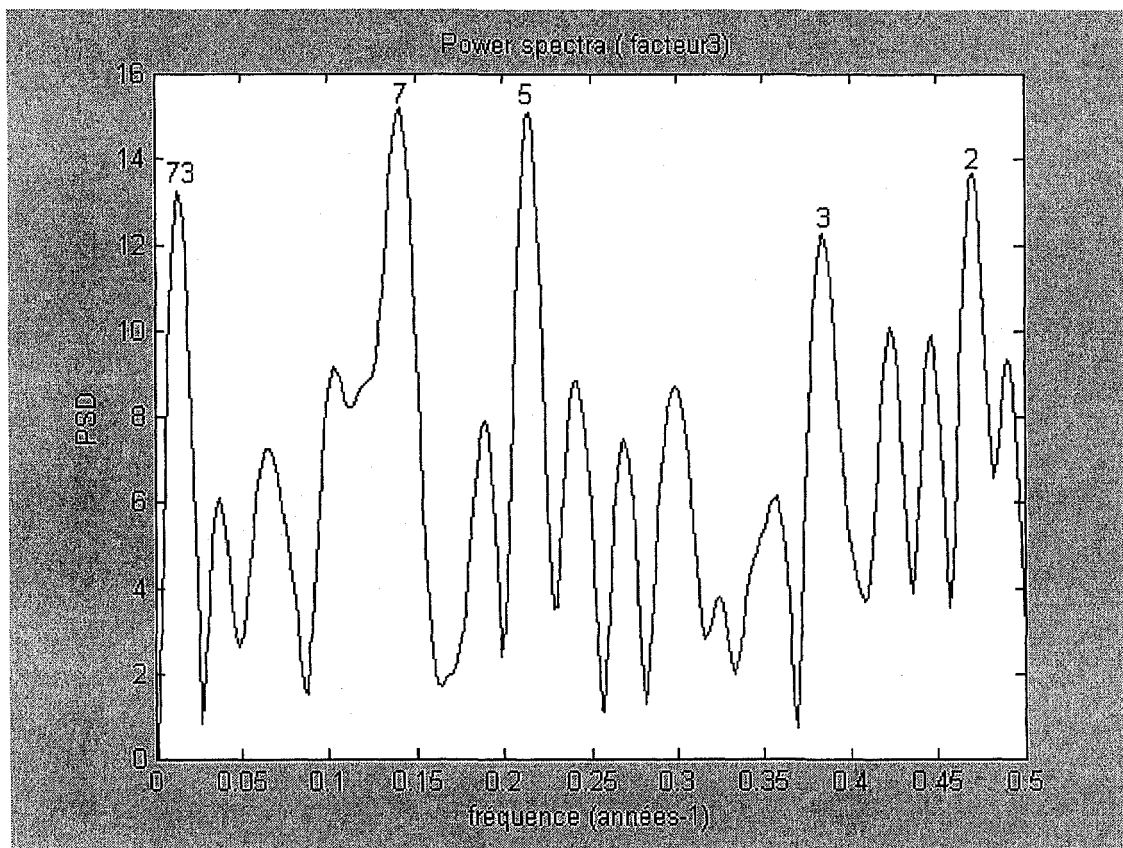


Figure 4c. Analyse spectrale de la composante III à l'échelle annuelle.

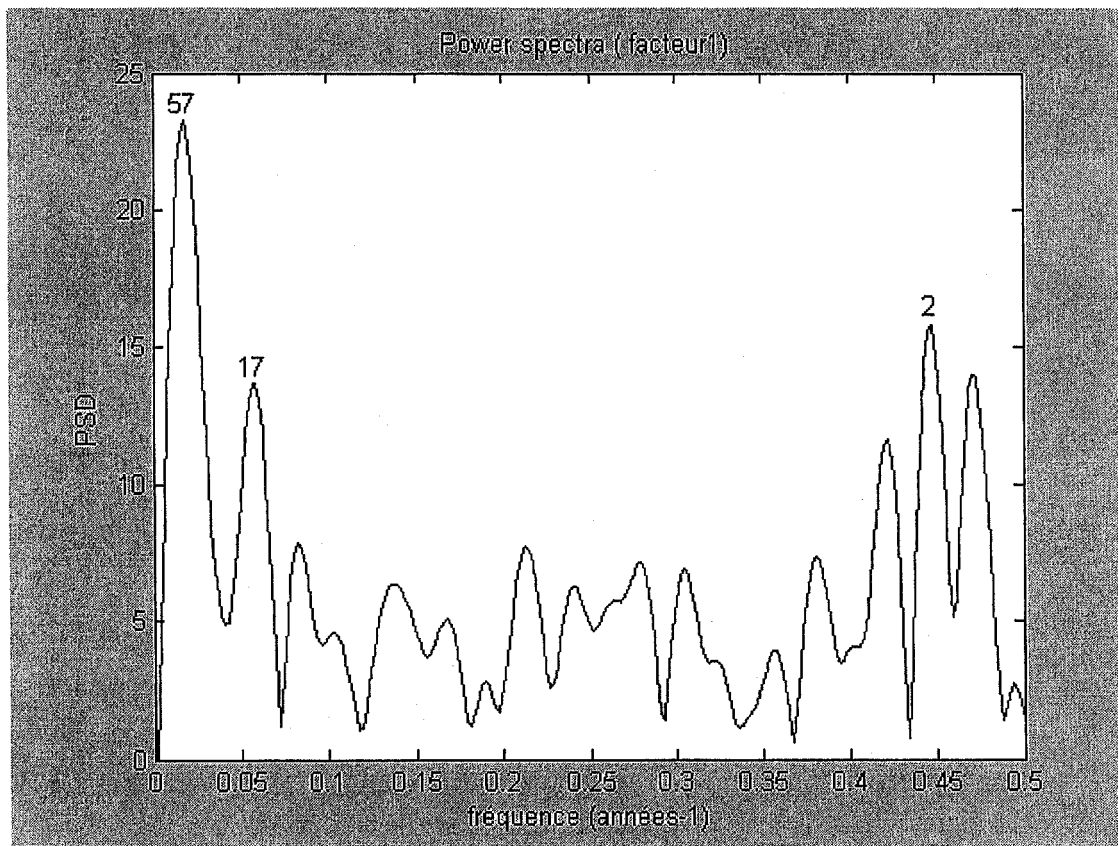


Figure 5a. Analyse spectrale de la composante I à l'échelle saisonnière.

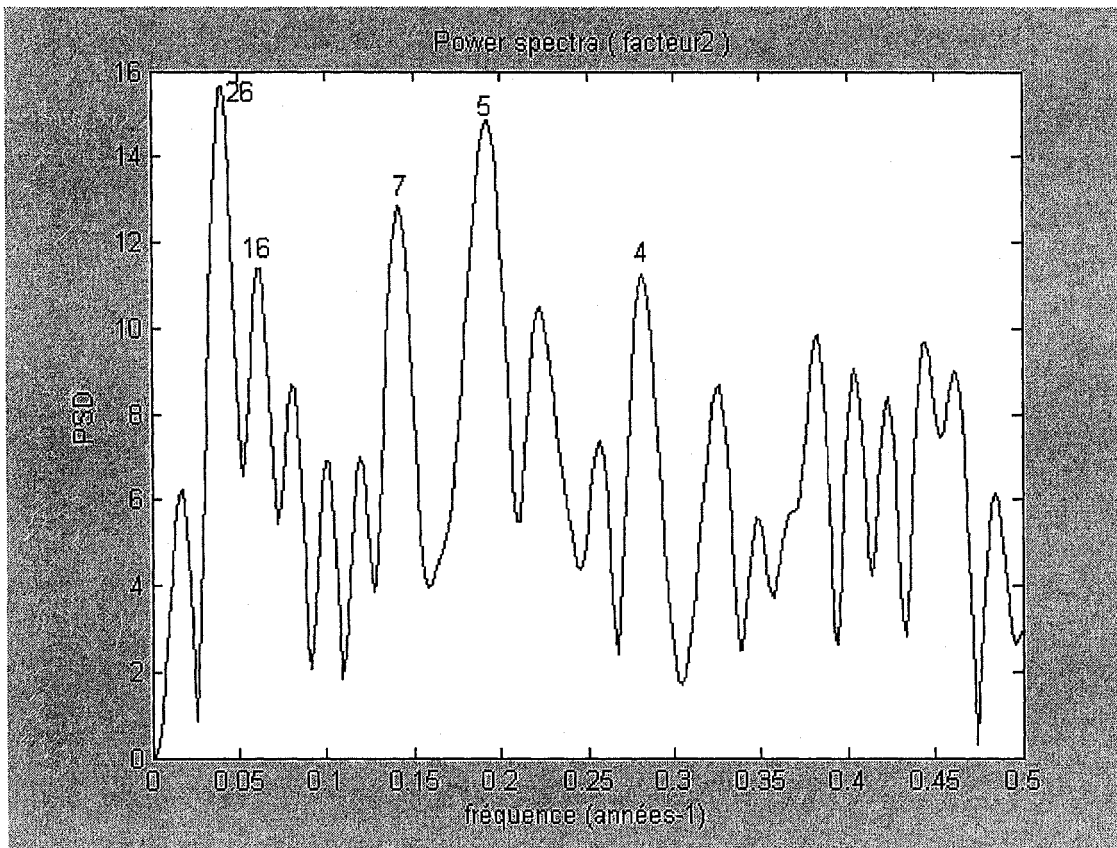


Figure 5b. Analyse spectrale de la composante II à l'échelle saisonnière.

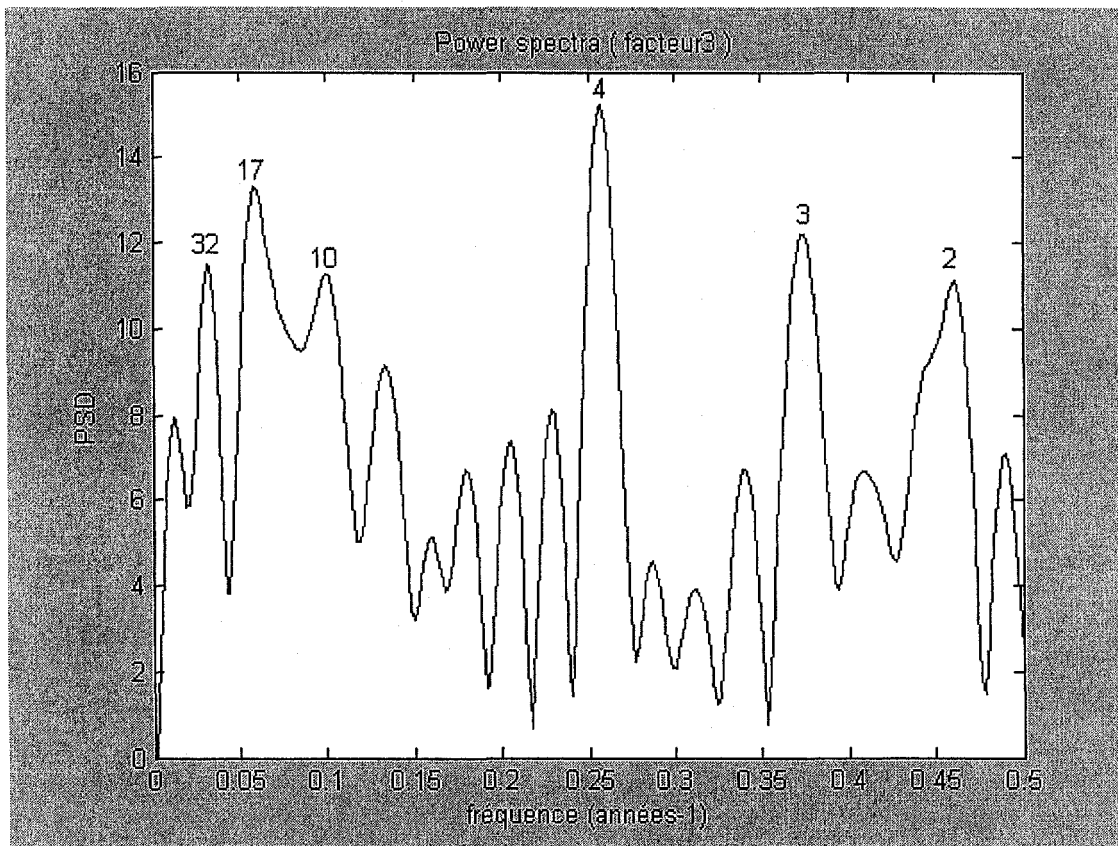


Figure 5c. Analyse spectrale de la composante III à l'échelle saisonnière.

Tableau 9. Relation entre fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques associés.

Type de fréquence	Périodicité	Facteurs climatiques
Très Basses Fréquences	> 20 ans	?
Moyennes Basses Fréquences	20 – 10 ans	Marées lunaires (17-20ans) Cycle solaire (10-12 ans) OA et ONA (6-2 ans) Cycle solaire (3-5 ans) GT (3-5 ans)
Basses Fréquences	10-2 ans	
Hautes Fréquences	6-12 mois	Mouvement de la terre autour du soleil
Très Hautes Fréquences	2-6 mois	Phénomènes climatiques locaux (fonte des neiges, orages)

Sources : Fleming et al. (2002), Kayser et al. (1990), Smith et al.(1998).

V. CONCLUSION

La variabilité inter-annuelle des débits résulte de l'interaction complexe de nombreux facteurs dont les effets peuvent se conjuguer ou s'opposer. L'identification de ces facteurs devient ainsi une tâche relativement délicate. En effet, aucune méthode statistique, quelle que soit sa performance, ne peut prétendre à elle seule être capable d'identifier tous ces facteurs. L'utilisation de plusieurs méthodes statistiques complémentaires se révèle ainsi une démarche prometteuse pour cerner l'influence des différents facteurs impliqués dans la variabilité inter-annuelle des débits. C'est cette démarche que nous avons adoptée dans le cadre de cette étude. Nous avons en effet comparé les résultats de trois méthodes d'analyse statistique (méthode de corrélations croisées, analyse en composantes principales et analyse spectrale) afin d'identifier les facteurs qui influencent la variabilité inter-annuelle des débits au Québec méridional. 17 chroniques des débits ont été ainsi analysées durant la période 1934-1990.

En ce qui concerne la méthode de corrélation croisée, aucun résultat concluant n'a pu être obtenu. Quant à l'analyse en composantes principales, elle nous a permis d'abord d'identifier trois régions hydrologiques homogènes du point de vue de la variabilité inter-annuelle des débits. Deux de ces régions sont situées en rive sud et la troisième en rive nord. Ensuite, l'analyse de corrélation entre trois indices climatiques (oscillation australe, oscillation nord atlantique et oscillation nord pacifique) et les notes factorielles des composantes principales associées à ces trois régions hydrologiques homogènes a révélé l'existence d'un lien bijectif entre les trois indices et les trois régions hydrologiques homogènes. Ainsi, l'oscillation australe est corrélée aux rivières situées dans la partie nord de la rive sud, l'oscillation nord atlantique, aux rivières situées au sud de la même rive et l'oscillation nord pacifique aux rivières situées sur la rive nord. En raison de nos connaissances encore limitées sur le lien entre les indices climatiques et la circulation atmosphérique au-dessus du Québec, il ne nous a pas été possible d'expliquer ce lien bijectif.

Cependant, la méthode des corrélations ne se limite qu'à déterminer l'influence des facteurs impliqués dans l'analyse. Pour identifier les facteurs qui n'ont pas été analysés par cette méthode, nous avons appliqué la méthode d'analyse spectrale. L'objectif de cette approche est d'associer les différents facteurs aux modes de fréquences identifiés sur les chroniques des débits. L'application de cette analyse nous a donc permis d'identifier trois modes de basses fréquences et deux modes de hautes fréquences. Ces différents modes peuvent être associés à des facteurs astronomiques (cycle des tâches solaires, marées lunaires), climatiques (Oscillation australe, oscillation nord atlantique) et parfois locaux (fonte des neiges par exemple).

Notre étude confirme le fait que la variabilité inter-annuelle des débits au Québec résulte de l'interaction complexe de nombreux facteurs. Ce qui rend ainsi sa prévision aléatoire et complexe même dans le cas d'un changement climatique provoqué par l'effet de serre.

VI. BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL F. & COULIBALY P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec Streamflow. *Journal of Climate* 17, 163-73.
- ANCTIL F. LAROUCHE W. & HOANG V.D. 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Resources Journal of Canada* 35, 125-46.
- ANCTIL F., MARTEL F. & HOANG V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering*. 25, 125-146.
- ANCTIL F. & MATHEVET T. 2004. Influence de la taille des régions homogènes sur la qualité de l'ajustement des crues de rivières non jaugées du Québec. *Canadian Water Resources Journal* 29, 47-58.
- ANDERSON J.E., SHIAU S-Y. & HARVEY K.D. 1992. Preliminary investigations between trends/patterns in surface water characteristics and climate variations. In : Using hydrometric data to detect & monitor climatic change, G.W Kite & K.D. Harvey (Eds), Proceedings NHRI workshop, n° 8, Saskatoon, 189-202.
- ASHFIELD D., PHINNEY R., BELORE H. & JEROME J.H. 1992. Criteria for identifying streamflow stations applicable to climate trends studies. In : Using hydrometric data to detect & monitor climatic change, G.W. Kite & K.D. Harvey (Eds), proceedings of NHRI workshop, n° 8, Saskatoon, 165-180
- ASHKAR F. & ROUSSELLE J. 1981. Design flow as a random variables : a risk study. *Water Resources Research* 17, 577-591.
- ASSANI A.A. & TARDIF S. 2004. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche Éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté).
- ASSANI A.A., TARDIF S., BENEGHIR S., CHALIFOUR A. & MHAMED M. 2004. Une nouvelle méthode de régionalisation des débits : approche éco-géographique. Application à la régionalisation des débits moyens annuels au Québec. Soumis au *Hydrological Sciences Journal*.(soumis)
- BERGER A., MELICE J.L. & HINNOV L. 1991. A strategy for frequency spectra of quaternary climate record. *Climate Dynamics* 5, 227-40.
- BOBÉE B. 1973. Sample error at T-year events computed by fitting a Pearson type 3 distribution. *Water Resources Research* 9, 1264-1270.
- BOBÉE B. 1975. The Log-Pearson type 3 distribution and its application in hydrology. *Water Resources Research* 11, 681-689.

- BOBÉE B. & MORIN G. 1973a. Statistique d'ordre de la loi Pearson 3 et de sa forme dérivée à asymétrie négative. *Revue de statistique* 21, 69-80.
- BOBÉE B. & MORIN G. 1973b. Détermination des intervalles de confiance de la loi Pearson 3 par les statistiques d'ordre. *Journal of hydrology* 20, 137-153
- BOBÉE B. & ROBITAILLE R. 1975. Correction of bias in the estimation of the coefficient of skewness. *Water Research Research* 11, 851-854.
- BOBÉE B. & ROBITAILLE R. 1977. The use of the Pearson type 3 and log-Pearson type 3 distributions revisited. *Water Research Research* 13, 427-443.
- BURN D.H., HAG-ELNUR M.A., ADAMOWSKI K. & OUARDA B.M.J., 2001. The use of hydrologic variables for detecting climatic change impacts. 27th annual scientific meeting of the Canadian geophysical union, Ottawa, 14-17 May (résumé).
- CAVADIAS G.S. 1990. The canonical correlation approach to regional flood estimation. Proceedings Symposium Regionalization in Hydrology. Ljubljana. April 1990, IAHS, 171-178.
- COULIBALY, P., ANCTIL, F., RAMUSSEN, P. et BOBÉE, B. 2000. A recurrent neural networks approach using indices of low-frequency climatic variability to forecast regional annual runoff. *Hydrological Processes* 14, 2755-77.
- DAVIAU J-L., ADAMOWSKI K. & PATRY, G.G. 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes* 14, 2731-53.
- DESFORGES P. & TREMBLAY R. 1974. Analyse de la fréquence des crues pour le Québec. Direction générale des eaux, ministère des Richesses naturelles, rapport H.P.-33, 46p.
- EL-JABI N, ASHKAR F. & ROUSSELLE J. 1986. Étude stochastique des crues au Québec. Ministère de l'Environnement du Québec, rapport H.P.59, 51p.
- ENVIRONNEMENT CANADA, 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526p.
- FLEMING, S.W., LAVENUE, A.M., ALY, A.H. et ADAMS, A. 2002. Practical applications of spectral analysis to hydrologic time series. *Hydrological Processes* 16, 565-74.
- GAUDET J., OUARDA T.B.M.J., BURN D.H., ADAMOWSKI K. & BOBÉE B., 2001. Bayesian analysis of stream changes across Canada. 27th annual scientific meeting of the Canadian geophysical union, Ottawa, 14-17 May (résumé).
- GINGRAS D., ADAMOWSKI K. & PILON K. 1994. Regional flood equations for the provinces of Ontario and Quebec. *Water Resources Bulletin* 30, 55-67.

- GREHYS 1996a. Presentation and review of some methods for regional flood frequency analysis. *Journal of hydrology* 186, 63-84.
- GREHYS, 1996b. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *Hydrological Journal* 186, 85-103.
- HARVEY K.D. & KOWALCHUK M.Z., 1992. The evaluation and planning of a national hydrometric network for detecting and monitoring climatic change. In : Using hydrometric data to detect & monitor climatic change, G.W. Kite & K.D. Harvey, proceedings of NHRI workshop, n° 8, Saskatoon, 181-188.
- HOANG V.D. 1977. Estimation des débits journaliers de crue printanière des rivières du Québec méridional. Ministère des Richesses naturelles du Québec, H.P.40, 43p.
- HOANG V.D. 1978. Meilleurs ajustements statistiques aux débits journaliers de crue et d'étiage des rivières du Québec. Ministère des Richesses naturelles du Québec. H.P. 47, 28p.
- KAYSER N., PROBST J-L., CADET D. & TARDY Y. 1990. Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 310, 757-63.
- LEROUX, M. 2000. La dynamique du temps et du climat. Masson, Paris, 2^{ème} édition, 367p
- LUTGENS F.K. & TARBUCK E.J. 1998. The atmosphere. Prentice Hall, New Jersey, 434p.
- OUARDA T.B.M.J., RASMUSSEN P.F., CANTIN J.-F., BOBÉE B., LAURENCE R., HOANG V.D. & BARABÉ G. 1999. Identification d'un réseau hydrométrique pour le suivi des modifications climatiques dans la province de Québec. *Revue des Sciences de l' Eau*. 12, 425-448.
- PEKAROVA P., MIKLANEK P. & PEKAR J. 2003. Spatial and temporal runoff oscillations analysis of the main rivers of the world during the 19th-20th centuries. *Journal of hydrology* 274, 62-79.
- POVEDA G. & MESA O.J. 1996. The North Atlantic Oscillation and its influence on the hydroclimatology of Colombia(in Spanish).In Proceedings of XVII Hydraulics and Hydrology Latin-American Congress, Ecuador. 2, 343-354
- RIBEIRO-CORRÉA G.S., CAVADIA B.C. & ROUSSELLE J. 1995. Identification of hydrology neighborhoods using canonical correlation analysis. *Journal of hydrology* 173, 71-89.

- ROY L., LECONTE R., BRISSETTE F.P. et MARCHE C. 2001. The impact of climate change on seasonal floods of a southern Quebec River basin. *Hydrological Processes* 15, 3167-3179
- SHABBAR A., BONSAI B. & KHANDEKAR M. 1997. Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 10, 3016-27.
- SHERIDAN S.C. 2002. The redevelopment of a weather-type classification scheme for North America. *International Journal of Climatology* 25, 51-68.
- SHERIDAN S.C. 2003. North America weather-type frequency and teleconnection indices. *International Journal of Climatology* 23, 27-45.
- SMITH L.C., TURCOTTE, D.L. et BRYAN, L.I. 1998. Stream flow characterization and features detection using a discrete wavelet transform. *Hydrological Processes* 12, 233-249.
- TARDIF, S. & ASSANI, A.A. 2004. Spatial variability factors of the characteristics of annual minimums flows in Québec (Canada). *Water Resources Research*. (submitted)
- TARDIF S., ASSANI A.A., BENEGHIR S., MHAMED M. & CHALIFOUR A. 2004. Regionalization and spatial variability factors of the characteristics of annual maximum flows in Québec (Canada). Application of the new ecogeographical approach. *Journal of hydrology* (submitted).
- VILLENEUVE, J.P., HUBERT, P., MAILHOT, A. & ROUSSEAU, A.N. 1998. La modélisation hydrologique et la gestion de l'eau. *Revue des Sciences de l'Eau* 11, 19-39
- WANNER, H. 1999. Le balancier de l'Atlantique nord. *La Recherche* 321, 72-73.
- YIOU, P., BAERT, E. et LOUTRE, M.F. 1996. Spectral analysis of climate data. *Surveys in Geophysics* 17, 619-63.
- YUE S., PILON P., PHINNEY B. & CAVADIAS G., 2001. Patterns of trend in Canadian streamflow. 27th annual scientific meeting of the Canadian geophysical union, 14-17 May (résumé).
- ZHANG X., HARVEY D.K, HOGG W.D & YUZYK T.R., 2001. Trends in Canadian streamflow. *Water Resources Research* 37, 987-998.

ANNEXES

PREMIER ARTICLE SOUMIS

**STRUCTURES SPATIALES DE LA VARIABILITÉ INTER-ANNUELLE DES DÉBITS
DANS LA PARTIE MÉRIDIONALE DU Québec (Canada) ET RELATION AVEC
CERTAINS INDICES CLIMATIQUES**

Safia BENSEGHIR* et Ali A. ASSANI*

* Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Adresse de correspondance.

Ali A. ASSANI

**Section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.
Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; email : Ali_Assani@uqtr.ca**

RÉSUMÉ

La régionalisation de la variabilité inter-annuelle des débits annuels et printaniers de 17 rivières du Québec méridional au moyen de l'analyse en composantes principales a révélé l'existence de quatre régions hydrologiques homogènes : deux en rives nord et deux en rive sud. Ces dernières sont les plus stables et les plus cohérentes dans le temps et sont disposées selon la latitude. L'influence maritime se limiterait seulement à la région hydrologique située au nord sur la rive sud lui conférant ainsi une plus grande stabilité et une plus forte cohérence que celle située au sud. La composition de deux régions hydrologiques homogènes de la rive nord varie beaucoup dans le temps. Nous avons mis en évidence un lien significatif bijectif entre les régions homogènes et les trois indices climatiques suivants : Oscillation australe, Oscillation nord atlantique et Oscillation nord pacifique. Ce lien bijectif est variable aussi dans le temps et en fonction de l'échelle d'analyse.

SPATIAL STRUCTURES OF STREAMFLOW INTER-ANNUAL VARIABILITY IN SOUTHERN QUÉBEC AND RELATIONSHIPS WITH SOME CLIMATIC INDEX.

ABSTRACT

Analysis inter-annual variability regionalization of streamflow (annual and spring discharges) in Southern Québec through principal component analysis revealed four hydrological homogeneous regions : two in the North Shore and two in the South Shore, gathered together according the latitude. These latter are more stable and coherent. The composition of the two hydrological homogeneous regions in north shore changes great in time. A bijectif link is sought between these hydrological homogeneous regions and the three climatic indexes (Southern Oscillation, North Atlantique Oscillation and Nord Pacific Oscillation). This link also change in time.

1. INTRODUCTION

La régionalisation en fonction de la variabilité temporelle (inter-annuelle) des débits n'a jamais fait l'objet d'aucune étude spécifique au Québec. Néanmoins, dans leur article consacré à l'analyse de la variabilité inter-annuelle des débits moyens annuels au Québec méridional à l'aide de la méthode des ondelettes en vue d'identifier les différents modes de basses fréquences, Anctil et Coulibaly (2004) ont pu délimiter deux régions hydrologiques homogènes. Ils attribuèrent l'existence de ces deux structures spatiales à l'influence maritime. Ils distinguèrent ainsi une région continentale située à l'ouest (rive nord) et une région orientale maritime située à l'est (rive sud) du méridien de 71°O. Les auteurs reconnurent toutefois la difficulté de tracer de manière précise la limite entre les deux régions. Cependant, ce découpage en deux régions hydrologiques homogènes soulève plusieurs interrogations. La première concerne l'attribution du caractère « maritime » à certaines stations situées dans la partie méridionale de la rive sud. La seconde porte sur l'absence de l'influence de la latitude sur ce découpage. Pourtant, cette influence latitudinale est très prépondérante sur la variabilité spatiale des caractéristiques des débits (Tardif et al., 2004 ; Tardif et Assani, 2004). Enfin, la troisième concerne le lien entre les deux régions hydrologiques homogènes et les trajectoires les plus fréquentes des masses d'air au Québec (Lutgens et Tarbuck, 1998; Sheridan, 2003).

L'objectif de notre étude est donc de déterminer les régions hydrologiques homogènes en fonction de la variabilité inter-annuelle des débits à partir de l'analyse des débits même afin de pouvoir répondre à ces trois interrogations. C'est une première étude consacrée spécifiquement à ce sujet. Nous voulons aussi vérifier la cohérence et

la stabilité de ces régions dans le temps et en fonction de l'échelle d'analyse. Enfin, nous établirons le lien entre certains indices de la circulation atmosphérique générale et les débits des rivières dans les différentes structures spatiales qui seront mises en évidence.

2. MÉTHODOLOGIE

2.1. Sources De Données.

Le réseau hydrographique du Québec est divisé en trois grands bassins versants (fig.1) : le bassin de Saint-Laurent ($673\,000\text{ km}^2$) ainsi que les bassins des Baies d'Ungava ($518\,000\text{ km}^2$) et d'Hudson ($492\,000\text{ km}^2$). Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au premier bassin versant puisque les séries hydrologiques dans les deux autres bassins versants sont encore relativement courtes (moins de 20 ans). Les données des débits analysées sont publiées dans le Sommaire chronologique de l'écoulement au Québec édité par Environnement Canada (1992). Nous avons retenu toutes les stations de rivières dont l'écoulement est naturel ou très faiblement régularisé et pour lesquelles les mesures des débits s'étendaient sur au moins 50 ans. La période d'étude considérée s'étend ainsi de 1934 à 1990. Nous avons choisi cette période d'étude pour les raisons suivantes :

- Elle permet de vérifier dans le temps la stabilité et la cohérence des régions hydrologiques homogènes.
- Elle correspond presque à celle analysée par Anctil et Coulibaly (2004), ce qui permet une meilleure comparaison des résultats. De plus, 12 des rivières analysées par ces auteurs font partie de notre fichier.
- Elle permet de calculer les coefficients de corrélation entre les indices climatiques et les débits de rivières sur une période relativement longue.

Au total, nous avons analysé 17 rivières : 11 en rive sud et 6 en rive nord. Il convient cependant de préciser que la distribution des stations dans l'espace n'est pas uniforme. Toutes les stations analysées sont concentrées dans la partie la plus méridionale de la province. En rive nord, il n'existe aucune station dans la partie septentrionale. Mais nous verrons plus loin que cette distribution ne constitue pas un handicap majeur dans l'interprétation des résultats.

En ce qui concerne les données standardisées de trois indices de circulation atmosphérique générale, elles ont été tirées sur les sites internet (consultés en octobre 2004) aux adresses suivantes :

- pour l'Oscillation Australe (OA) : <http://www.bom.gov.au/climate/current/soihtm1.shtml>,
- pour l'Oscillation Nord Atlantique (ONA) : <http://www.cgd.ucar.edu/~jhurrell/nao.stat>.
- pour l'Oscillation Nord Pacifique (ONP) : http://tao.atmos.washington.edu/data_sets/pna/

Ces trois indices sont abondamment décrits dans la littérature scientifique (Cadet et Garnier, 1988 ; Rogers, 1984; Ropelewski et Halpert, 1987; Sheridan, 2003; Wanner, 1999). Nous avons donc jugé inutile d'y revenir.

2.2. Méthodes D'Analyse.

Pour déterminer les régions hydrologiques caractérisées par une homogénéité de la variabilité inter-annuelle des débits, nous avons appliqué la méthode éprouvée d'analyse en composantes principales. C'est une méthode couramment utilisée pour la détermination des structures spatiales homogènes (Kuhnel et al. 1990; Bigot et al. 1997, Moron et al. 1995). L'analyse a été appliquée à partir de la matrice des corrélations (et non celle de covariance) moins sensible aux valeurs extrêmes. Les corrélations ont été

calculées entre les débits mesurés aux différentes stations. Les débits moyens annuels ont été déduits du cumul des débits mensuels d'octobre à septembre et les débits saisonniers printaniers, du cumul des débits mensuels d'avril à juin. Nous nous sommes limités à cette saison car c'est pendant cette période qu'on enregistre plus de la moitié de l'écoulement annuel en raison de la fonte des neiges (Assani et Tardif 2004). Le regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes a été fondé sur les valeurs de saturations des stations sur les composantes principales significatives après rotation varimax. Les composantes principales dont les valeurs propres étaient supérieures ou égales à 1 étaient considérées comme significatives. Ce critère est le plus utilisé dans la littérature scientifique.

Dans chaque structure spatiale homogène, nous avons corrélé les indices de circulation atmosphérique générale aux notes factorielles des années sur les composantes principales significatives. Cette approche nous a ainsi permis de déterminer l'influence de ces indices climatiques sur la variabilité inter-annuelle des débits dans chaque structure spatiale homogène.

3. RÉSULTATS

3.1. Analyse À L'Échelle Annuelle

3.1.1. Les Structures Spatiales Homogènes Pendant La Période 1934-1990.

Le tableau 1 présente les valeurs de saturations des stations analysées sur les quatre composantes significatives (valeurs propres supérieures à 1). La variance totale expliquée par ces quatre composantes atteint 75 %. La première composante principale explique à elle seule 30% de cette variance. Quant aux structures spatiales, les valeurs de saturations révèlent quatre groupes des rivières associés chacun à une composante

principale. Ainsi, la première composante représente les rivières situées dans la partie méridionale de la rive sud à l'exception de la rivière l'Assomption située en rive nord, la seconde composante, les rivières situées dans la partie septentrionale de la même rive (fig.2). La troisième composante principale regroupe les rivières de la rive nord, et la dernière composante est associée seulement à une seule rivière, Sainte-Anne, située sur la même rive.

À la lumière de ces résultats, l'analyse en composante principale nous a permis de délimiter quatre régions hydrologiques homogènes sur les deux rives. Toutefois, en rive nord, la quatrième composante est associée seulement à une seule rivière. Quoiqu'il en soit, le regroupement des rivières en régions hydrologiques homogènes s'opère selon la latitude aussi bien en rive nord qu'en rive sud. Par ailleurs, ce sont les deux régions de la rive sud qui apparaissent les plus cohérentes en raison des variances expliquées élevées de composantes principales auxquelles elles sont associées. Enfin, contrairement aux résultats d'Anctil et Coulibaly (2004), toutes les stations d'une même rive ne forment pas une seule région hydrologique homogène.

3.1.2. Évolution Temporelle Des Structures Spatiales Homogènes (périodes 1934-1969 et 1970-1990).

Rappelons que le but de la comparaison des structures spatiales pendant les deux périodes est de vérifier la stabilité et la cohérence dans le temps des quatre régions hydrologiques définies ci-haut. L'année 1970 est considérée par de nombreux auteurs comme l'année marquant un tournant climatique dans les latitudes moyennes de l'hémisphère nord (Anctil et Coulibaly 2004; Chen et Rao 2002; Kiely 1999; Shabbar et al. 1997). Ainsi, au Québec, Shabbar et al. (1997) ont noté un refroidissement

progressif du climat dans la partie nord-orientale depuis 1970. Quant à Anctil et Coulibaly (2004), ils ont observé un changement de relation entre certains indicateurs de la circulation générale et les débits de rivières. Ouarda et al. (1999) ont observé des ruptures des moyennes et/ou des variances dans les séries hydrologiques de plusieurs rivières au Québec.

Pendant la période 1934-1969, nous n'avons observé aucun changement significatif des structures spatiales homogènes par rapport à la période 1934-1990. Toutefois, la dernière composante principale est associée à la rivière Jacques Cartier et non à Sainte-Anne, les deux étant situées proches l'une de l'autre et plus nord par rapport aux autres. En revanche, durant la période 1970-1990, nous avons noté quelques changements qui méritent d'être soulignés (tableau 2) :

- La première composante principale représente les rivières situées dans la partie nord de la rive sud et non plus celles situées dans la partie sud. On notera aussi que la rivière l'Assomption, située en rive nord, ne fait plus partie de la région hydrologique homogène constituée des rivières situées dans la partie méridionale de la rive sud.
- En rive nord, on note un changement de la composition de deux régions hydrologiques homogènes. En effet, la troisième composante principale n'est plus associée qu'aux deux rivières (Matawin et Petite Nation) et la quatrième, à deux rivières (Coulange et Vermillon) dispersées géographiquement. Ce qui traduit une instabilité des régions de la rive nord dans le temps.
- Une hausse de la variance totale expliquée par les quatre composantes significatives. Cette variance excède 80%.

3.1.3. Relation Entre Composantes Principales Et Les Trois Indices Climatiques À L'Échelle Annuelle

Pour déterminer les facteurs climatiques susceptibles d'expliquer la variabilité inter-annuelle des débits dans les quatre structures spatiales homogènes, nous avons corrélé les notes factorielles des années sur les composantes principales significatives aux trois indices climatiques, à savoir l'oscillation australe (OA), l'oscillation nord atlantique (ONA) et l'oscillation nord pacifique (ONP). Ces trois oscillations sont généralement considérées comme les principaux indicateurs de la variabilité inter-annuelle du climat dans l'hémisphère nord. Nous avons calculé les corrélations croisées afin de déterminer l'influence éventuelle des années précédentes. En effet, on est en droit de penser que l'influence de certains de ces indices sur les débits peut se manifester avec un certain retard dans le temps.

Le tableau 3 présente les coefficients de corrélation croisés pour la période 1934-1990. Il révèle l'existence des coefficients de corrélation statistiquement significatifs. Toutefois, le lien entre les indices climatiques et les composantes principales est fort variable. Ainsi, l'oscillation australe est seulement corrélée à la région hydrologique homogène associée à la seconde composante principale (rivières situées dans la partie nord de la rive sud). Quant à l'oscillation nord atlantique, elle est significativement corrélée aux rivières situées dans la partie sud de la même rive (première composante principale) et enfin, l'oscillation nord pacifique est en corrélation positive avec les rivières de la rive nord (troisième composante principale). Les valeurs des coefficients de corrélation dans tous les cas demeurent relativement faibles car elles n'excèdent guère 0,400. La part de la variabilité inter-annuelle des débits moyens annuels expliquée par les trois indices demeure relativement faible au Québec. Elle n'excède pas 20%. Ceci

suppose l'existence des autres facteurs qui influencent la variabilité inter-annuelle des débits dans le Québec méridional.

Nous avons voulu vérifier aussi si le lien entre les indices climatiques et les débits de rivières restent stables dans le temps. Ainsi, nous avons calculé les coefficients de corrélation entre les deux types de variables durant les périodes 1934-1969 et 1970-1990. En ce qui concerne la première période, le seul changement observé est l'existence d'un lien significatif entre l'indice ONP et la première composante principale associée aux rivières situées dans la partie sud de la rive sud. En revanche, pendant la période 1970-1990, des changements importants suivants ont été observés :

- L'indice OA devient significativement corrélé à la première composante principale. Mais ce lien est fort décalé dans le temps.
- L'indice ONA n'est plus significativement corrélé à la première composante principale. Mais il le devient avec la deuxième et la troisième composantes principales.
- Quant à l'indice ONP, il devient significativement corrélé aux deux premières composantes principales.

Il ressort de cette analyse que le lien entre les indices climatiques et les débits dans les quatre régions hydrologiques homogènes ne sont pas stables dans le temps. Les changements ont surtout été observés pendant la période 1970-1990.

3.2. Analyse À L'Échelle Saisonnière

3.2.1. Structures Spatiales Homogènes Pendant La Période 1934-1990.

Rappelons que pour les raisons mentionnées précédemment, cette analyse se limite seulement à la saison printanière. Le tableau 4 présente les valeurs de saturations des rivières sur les quatre composantes principales. La comparaison avec les résultats

obtenus à l'échelle annuelle (voir tableau 1) révèle deux différences significatives suivantes :

- La variance totale cumulée de quatre composantes a augmenté. Elle a dépassé 80%. Mais la variance totale expliquée par la première composante principale a diminué. Elle devient inférieure à 30%.
- La région hydrologique homogène associée à la première composante principale a changé. En effet, à l'échelle saisonnière, la première composante principale représente quelques rivières de la rive nord alors qu'à l'échelle annuelle, elle regroupe les rivières de la rive sud située dans la partie méridionale. Ainsi, la région hydrologique homogène de la rive nord devient plus cohérente à l'échelle saisonnière qu'à l'échelle annuelle. Mais les deux régions de la rive sud sont toujours bien différenciées.

À la lumière de ces résultats, la composition des régions hydrologiques homogènes de la rive sud n'est pas influencée par l'échelle d'analyse. Elles apparaissent ainsi plus stables que les régions de la rive nord. Toutefois, on note un affaiblissement (diminution de la variance de la composante principale associée à cette région) de la cohérence de la région hydrologique homogène située dans la partie méridionale de la rive sud. En revanche, cette cohérence devient forte pour la région hydrologique homogène située dans la partie méridionale de la rive nord malgré le changement de sa composition. Ce changement dénote une instabilité des régions hydrologiques de la rive nord dans le temps déjà observée à l'échelle annuelle.

3.2.2. Évolution Temporelle Des Structures Spatiales Homogènes (périodes 1934-1969 et 1970-1990).

Durant la période 1934-1969, le seul changement majeur observé est la disparition de la dernière composante principale. Il n'en reste ainsi que trois. La première composante représente quelques rivières de la rive nord et les deux dernières composantes, les deux régions hydrologiques homogènes de la rive sud. Quant à la période 1970-1990, les structures spatiales sont comparables à celles mises en évidence à l'échelle annuelle. Toutefois, la structure spatiale de la rive nord associée à la troisième composante est devenue plus cohérente qu'à l'échelle annuelle. De plus, la dernière composante principale est associée exclusivement à la rivière Coulonge. L'analyse à l'échelle saisonnière confirme ainsi l'instabilité des régions hydrologiques homogènes de la rive nord et la stabilité de celles de la rive sud.

3.1.3. Relation Entre Composantes Principales Et Certains Indices Climatiques À L'Échelle Saisonnière.

Les coefficients de corrélation croisés sont consignés dans le tableau 5. Nous avons aussi tenu compte des saisons de l'année précédente. Les valeurs de coefficients de corrélation sont comparables à celles observées à l'échelle annuelle. Cependant, les indices climatiques ne sont plus corrélés aux mêmes régions hydrologiques homogènes. Ainsi, l'oscillation australe devient corrélée aux rivières méridionales de la rive sud (composante II). Quant à l'oscillation nord atlantique, elle est corrélée positivement aux rivières de la rive nord alors que l'oscillation nord pacifique l'est aux rivières septentrionales de la rive sud. Pendant la période 1934 et 1969, l'indice ONA est corrélé positivement à la deuxième composante principale et l'indice ONP n'est plus corrélé à

aucune rivière. Quant à la période 1970-1990, il n'existe aucune corrélation significative entre les indices climatiques et les débits de rivières.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION.

La régionalisation des débits (moyens annuels et printaniers) de 17 rivières situées dans la partie méridionale du Québec en fonction de leur variabilité inter-annuelle durant la période 1934-1990 a mis en évidence quatre régions hydrologiques homogènes réparties deux à deux sur les deux rives du fleuve. Contrairement à la rive nord, les deux régions homogènes de la rive sud sont stables et cohérentes dans le temps. En effet, leurs compositions (nombre des stations) et les variances totales expliquées des composantes principales auxquelles elles sont associées changent peu dans le temps. Le changement significatif de la variance a affecté seulement la région hydrologique homogène située dans la partie méridionale.

La répartition spatiale de ces régions hydrologiques homogènes révèle que les deux régions stables de la rive sud sont réparties selon la latitude : l'une est située au nord et l'autre, au sud. L'influence de la longitude se manifeste par l'existence de deux autres régions hydrologiques en rive nord. Même sur cette rive, les deux régions hydrologiques se répartissaient selon la latitude. La disposition longitudinale de deux régions hydrologiques homogènes délimitées par Ancil et Coulibaly (2004) a été interprétée comme le résultat de l'influence maritime au Québec méridional. Cependant, la mise en évidence d'une seconde région hydrologique homogène dans la partie nord sur la rive sud ne peut s'accommoder à cette explication. De plus, cette région est apparue comme la plus stable de quatre. Sans vouloir minimiser cette influence maritime, il nous semble que la trajectoire des masses d'air, reflet de la circulation

atmosphérique, puisse expliquer la répartition spatiale des régions hydrologiques homogènes. À l'échelle du Québec, on peut définir grossièrement trois trajectoires principales des masses d'air les plus fréquentes (Lutgens et Tarbuck, 1998) : sud-nord (air tropical), nord-sud (air polaire) et ouest-est (air maritime continentalisé). Les deux premières trajectoires peuvent expliquer la disposition latitudinale des régions hydrologiques homogènes et la troisième, la disposition longitudinale. La faible fréquence d'une masse d'air de trajectoire est-ouest limite l'influence maritime au Québec dans cette direction. Même en cas de l'existence de cette trajectoire, il n'existe aucune barrière naturelle infranchissable entre les deux rives du fleuve, qui confinerait cette influence maritime à la rive sud seulement. En revanche, à notre avis, le Golfe de Saint-Laurent, par sa disposition latitudinale, peut contribuer à la différenciation des régions hydrologiques homogènes selon la latitude car il constitue une voie de pénétration de l'air maritime vers l'intérieur dont l'influence s'estomperait progressivement vers le sud. Il s'ensuit qu'à notre avis, l'influence maritime se manifesterait plus selon la latitude, le long de la vallée du fleuve, que selon la longitude au Québec. La stabilité et la cohérence de la région hydrologique homogène située dans la partie nord de la rive sud pourrait être attribuée à cette influence maritime qui y prédomine alors que les autres régions sont soumises à l'influence des autres masses d'air. Enfin, il convient de préciser que notre analyse se fondant sur un nombre limité des rivières (17 seulement) tout comme celle d'Ancil et Coulibaly (2004), ne permet pas de mettre en évidence toutes les régions hydrologiques homogènes au Québec du fait qu'on ignore par exemple le comportement des rivières situées dans les parties septentrionale et occidentale de la rive nord.

En ce qui concerne le lien entre les indices climatiques et les débits des rivières, il ressort de cette étude que l'influence des indices ne s'étend pas à l'échelle du Québec. En effet, les trois indices analysés ne sont corrélés chacun qu'à certaines régions hydrologiques homogènes. Ainsi, l'oscillation australe associée aux événements El Niño n'est significativement corrélée qu'aux rivières situées dans la partie nord de la rive sud. Par ailleurs, les corrélations observées peuvent varier en fonction de la période d'étude et de l'échelle d'analyse. En ce qui concerne les valeurs de coefficients de corrélation, elles sont comparables à celles calculées entre l'oscillation australe et les précipitations au Québec (Shabbar et al. 1997). Il est difficile d'expliquer ce lien bijectif observé entre les indices climatiques et les régions hydrologiques homogènes. Car nos connaissances sont encore très limitées sur la relation entre ces indices et la fréquence des masses d'air au Québec. À l'échelle du continent nord-américain, Sheridan (2003) a établi cette relation. Cet auteur a révélé notamment que dans la partie nord-orientale des États-Unis, proche du Québec, lorsque l'oscillation nord pacifique est en phase positive, cette région est soumise à une intrusion fréquente de l'air polaire mais une diminution significative de la fréquence de l'air tropical humide. Quant à l'oscillation nord atlantique, lorsque celle-ci est en phase positive, on observe un remplacement de l'air polaire humide par l'air polaire sec dans la partie nord-orientale du Canada. Mais cette information est difficile à transposer à l'échelle du Québec pour rendre compte du lien bijectif entre les indices climatiques et les régions hydrologiques. Enfin, notre étude révèle que le lien entre les indices climatiques et la variabilité inter-annuelle est relativement faible corroborant ainsi les observations de Shabbar et al. (1997) sur la relation entre le phénomène El Niño/ Oscillation Australe et les précipitations dans le Québec méridional. Ce faible lien peut s'expliquer en partie par l'existence des autres

facteurs dont l'influence ne peut être mise en évidence par les méthodes de corrélations croisées utilisée dans cette étude. L'utilisation des autres techniques d'analyse statistique s'avère donc nécessaire.

REMERCIEMENTS

Nous remercions F. Lajoie pour les cartes ainsi que le CRSNG et le FIR pour leur soutien financier. Nos remerciements s'adressent aussi aux professeurs Chalifour et Mhamed pour leurs conseils pertinents lors de l'élaboration de ce manuscrit.

BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL, F. et COULIBALY, P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec Streamflow. *Journal of Climate* 17, 163-73.
- ANCTIL, F., MARTEL, F. et HOANG, V.D. 1998. Analyse régionale des crues journalières de la province du Québec. *Canadian Journal of Civil Engineering* 25, 125-46.
- ANCTIL, F. LAROUCHE, W. et HOANG, V.D. 2000. Analyse régionale des étiages 7-jours de la province de Québec. *Water Quality Resources Journal of Canada* 35, 125-46.
- ASSANI, A.A. et TARDIF, S. 2004. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec (Canada). Approche Éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau* (accepté).
- ASSANI, A.A., TARDIF, S., BENEGHIR, S., CHALIFOUR, A. et MHAMED, M. 2004. Une nouvelle méthode de régionalisation des débits : approche éco-géographique.

Application à la régionalisation des débits moyens annuels au Québec. Soumis au *Hydrological Sciences Journal*.(soumis)

BELZILE, L., BÉRUBÉ, P., HOANG, V.D. et LECLERC, M. 1997. Méthode échohydrologique de détermination des débits réservés pour la protection des habitats du poisson dans les rivières du Québec. Rapport présenté par l'INRS-Eau et le Groupe-conseil Génivar inc. au ministère de l'Environnement et de la Faune et à Pêches et Océans Canada. 83p + 8 annexes.

BIGOT, S., CAMBERLIN, P., MORON, V. Et RICHARD, Y. 1997. Structures spatiales de la variabilité des précipitations en Afrique : une transition climatique à la fin des années 1960 ? *Comptes Rendus de l' Académie des Sciences de Paris*, 324, série II a, 181-88.

CADET, D. et GARNIER, R. 1988. L'oscillation australe et ses relations avec les anomalies climatiques globales. *La Météorologie* 21, 4-18.

CHEN, H.L. et RAO, A.R. 2002. Testing hydrologic time series for stationarity. *Journal of Hydrological Engineering* 7, 129-36.

DAVIAU, J-L., ADAMOWSKI, K. Et PATRY, G.G. 2000. Regional flood frequency analysis using GIS, L-moment and geostatistical methods. *Hydrological Processes* 14, 2731-53.

DESFORGES, P. et TREMBLAY, R. 1974. Analyse de la fréquence des crues pour le Québec. Direction générale des eaux, ministère des Richesses naturelles, rapport H.P.-33, 46p.

ENVIRONNEMENT CANADA, 1992. Sommaire chronologique de l'écoulement. Province du Québec. Direction générale des eaux intérieures, Ottawa, 526p.

- GINGRAS, D. et ADAMOWSKI, K. 1993. Homogeneous region delineation based on annual flood generation mechanisms. *Hydrological Sciences Journal* 38, 103-21.
- GINGRAS, D., ADAMOWSKI, K. et PILON, K. 1994. Regional flood equations for the provinces of Ontario and Quebec. *Water Resources Bulletin* 30, 55-67.
- GREHYS, 1996. Inter-comparison of regional flood frequency procedures for Canadian rivers, *Hydrological Journal* 186, 85-103.
- HARE, F.K., LONGLEY R.W et al., 1953. The climate of Québec and Labrador. Department of transport – Meteorological Branch, Toronto, 6-111
- KIELY, G. 1999. Climate change in Ireland from precipitation and streamflow observations. *Advances Water Resources* 23, 141-51
- KUHNEL, I., McMAHON, T.A., FINLAYSON, B.L. et HAINES, A. 1990. Climatic influences on streamflow variability : a comparison between southeastern Australia and southeastern United States of America. *Water Resources Research* 26, 2483-96.
- LUTGENS, F.K. et TARBUCK, E.J. 1998. The atmopshere. Prentice Hall, New Jersey, 434p.
- MORON, V., BIGOT, S. et ROUCOU, P. 1995. Rainfall variability in subequatorial America and Africa relationship with the main SST modes (1951-1990). *International Journal of Climatology* 15, 1297-1322
- ROGERS, J.C. 1984. The association between the North Atlantic Oscillation and the Southern Oscillation in the Northern Hemisphere. *Monthly Weather Review* 112, 1999-2015.
- ROPELEWSKI, C.F. et HALPERT, M.S. 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Monthly Weather Review* 115, 1606-1626.

- SHABBAR, A., BONSAI, B. et KHANDEKAR, M. 1997. Canadian precipitation patterns associated with the Southern Oscillation. *Journal of Climate* 10, 3016-27.
- SHERIDAN S.C. 2003. North America weather-type frequency and teleconnection indices. *International Journal of Climatology* 23, 27-45.
- TARDIF, S., ASSANI, A.A., BENSEGHIR, S., MHAMED, M. et CHALIFOUR, A.- Regionalization and spatial variability factors of the characteristics of annual maximum flows in Québec (Canada). Application of the new ecogeographical approach. *Journal of hydrology* (submitted).
- WANNER, H. 1999. Le balancier de l'Atlantique nord. *La Recherche* 321, 72-73.

Tableau 1. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales après rotation varimax (1934-1990). Échelle annuelle.

Rivières	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.872	0.127	0.134	-0.177
Nicolet de sud-ouest	0.845	0.105	0.182	0.249
Chateaugay	0.841	0.215	0.069	-0.106
Beaurivage	0.835	0.279	0.295	0.097
Sud	0.784	0.329	0.215	0.097
L'Assomption	0.759	0.226	0.420	0.184
Matane	0.232	0.862	0.06	-0.001
Blanche	-0.169	0.850	-0.048	0.067
Rimouski	0.216	0.847	0.155	0.105
Trois-Pistoles	0.264	0.847	0.259	0.167
Loup	0.409	0.695	0.249	0.178
Coulonge	0.000	0.103	0.722	0.316
Petite Nation	0.393	0.144	0.713	-0.226
Matawin	0.328	0.325	0.676	-0.071
Vermillon	0.485	-0.009	0.669	0.026
Sainte-Anne	0.133	0.282	0.040	0.866
Jacques Cartier	0.423	0.367	0.145	-0.044
Valeurs propres	5.193	3.928	2.521	1.169
Variance totale expliquée cumulée (%)	30.5	58.7	72.6	83.7

Tableau 2. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales après rotation varimax (1970-1990). Échelle annuelle

Rivières	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.074	0.925	0.138	-0.139
Nicolet de sud-ouest	0.209	0.902	0.043	0.191
Chateaugay	0.099	0.912	-0.072	0.116
Beaurivage	0.423	0.739	0.352	0.278
Sud	0.513	0.719	0.206	0.292
L'Assomption	0.428	0.607	0.399	0.335
Matane	0.912	0.115	0.175	-0.002
Blanche	0.942	-0.023	0.243	-0.040
Rimouski	0.806	0.176	0.325	0.081
Trois-Pistoles	0.907	0.182	0.185	0.180
Loup	0.797	0.384	0.086	0.178
Coulonge	0.427	-0.136	-0.065	0.736
Petite Nation	0.233	0.021	0.910	0.085
Matawin	0.364	0.200	0.842	0.195
Vermillon	-0.052	0.466	0.310	0.729
Sainte-Anne	0.696	0.278	-0.013	0.166
Jacques Cartier	-0.013	0.346	0.369	0.567
Valeurs propres	5.366	4.632	2.363	1.883
Variance totale expliquée cumulée (%)	31.6	58.8	72.7	83.8

Tableau 3. Corrélations croisées entre les trois premières composantes principales et les indices climatiques (1934-1990). Échelle annuelle.

Année	OA			ONA			ONP		
	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII
(0)	0.175	-0.061	0.066	0.227	-0.252	-0.117	-0.044	0.294	0.328
(-1)	0.089	-0.304	-0.187	0.277	-0.044	0.053	-0.155	0.089	-0.006
(-2)	0.133	0.111	-0.012	0.130	-0.205	-0.184	-0.172	-0.207	-0.015
(-3)	-0.002	0.327	-0.053	-0.131	0.142	-0.028	0.223	0.012	-0.079
(-4)	-0.011	0.083	0.080	-0.017	0.039	-0.188	-0.274	0.013	-0.061
(-5)	-0.003	-0.153	0.077	-0.245	-0.086	-0.123	-0.135	0.031	-0.064
(-6)	-0.151	0.069	-0.168	-0.082	-0.160	0.112	-0.032	-0.259	0.107

Les coefficients des corrélation significatifs au seuil de 5% sont soulignés en gras.

Tableau 4. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales après rotation varimax (1934-1990). Échelle saisonnière (printemps).

Rivière	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.403	0.230	0.738	0.03
Nicolet de sud-ouest	0.148	0.085	0.863	0.197
Chateaugay	0.146	0.043	0.893	0.074
Beaurivage	0.331	0.272	0.792	0.169
Sud	0.350	0.420	0.725	0.132
L'Assomption	0.698	0.135	0.481	0.343
Matane	0.203	0.884	0.138	-0.107
Blanche	-0.169	0.845	0.021	0.316
Rimouski	0.209	0.845	0.119	0.034
Trois-Pistoles	0.252	0.808	0.303	0.155
Loup	0.461	0.633	0.374	0.159
Coulonge	0.534	0.042	0.045	0.633
Petite Nation	0.798	0.193	0.325	-0.083
Matawin	0.742	0.351	0.299	0.290
Vermillon	0.924	0.07	0.125	-0.125
Sainte-Anne	-0.058	0.233	0.382	0.773
Jacques Cartier	0.791	0.158	0.279	0.205
Valeurs propres	4.242	3.841	4.173	1.517
Variance totale expliquée cumulée (%)	25.0	47.6	72.1	81

Tableau 5. Corrélations croisées entre les composantes principales et les indices climatiques (1934-1990). Échelle saisonnière.

Saisons	OA			ONA			ONP		
	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII	CPI	CPII	CPIII
P(0)	0.180	-0.028	0.111	-0.020	-0.155	0.244	0.031	0.099	-0.019
H(0)	0.013	-0.151	0.164	0.224	-0.082	-0.054	0.120	0.219	-0.059
A(-1)	0.059	-0.136	0.162	-0.009	-0.195	0.071	-0.261	0.223	-0.114
E(-1)	-0.031	-0.227	0.072	0.080	-0.140	0.241	-0.165	-0.025	-0.069
P(-1)	-0.097	-0.265	0.139	-0.213	-0.144	-0.160	0.068	0.100	0.225
H(-1)	-0.091	-0.150	-0.054	0.353	0.094	-0.019	0.012	-0.048	0.049

0 = indices climatiques saisonniers de la même année que les débits printaniers. (-1) : indices climatiques saisonniers de l'année précédente. Les valeurs des coefficients de corrélation significatives au seuil de 5% sont soulignées en gras.

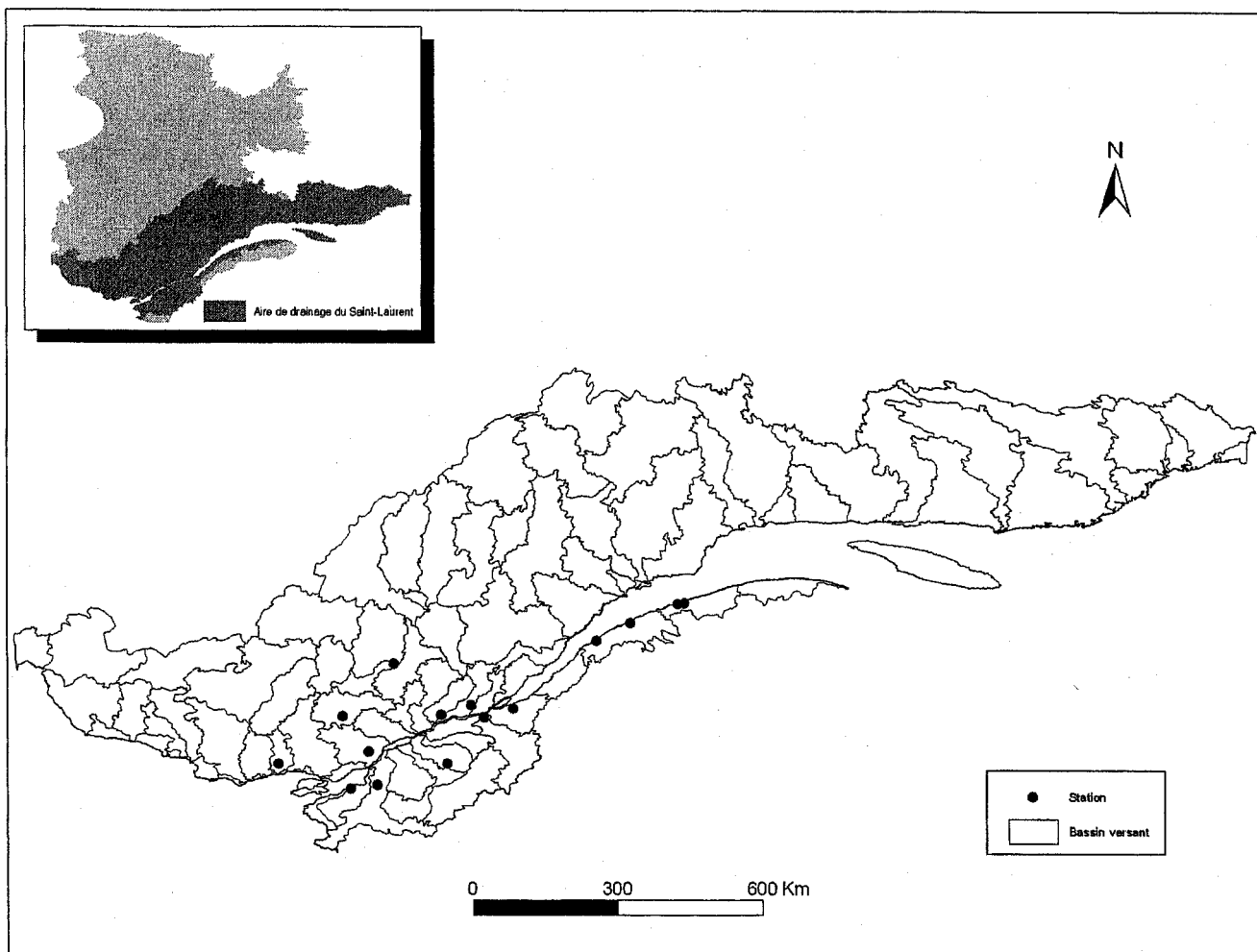


Fig. 1

Fig.1 Benseghir et Assani

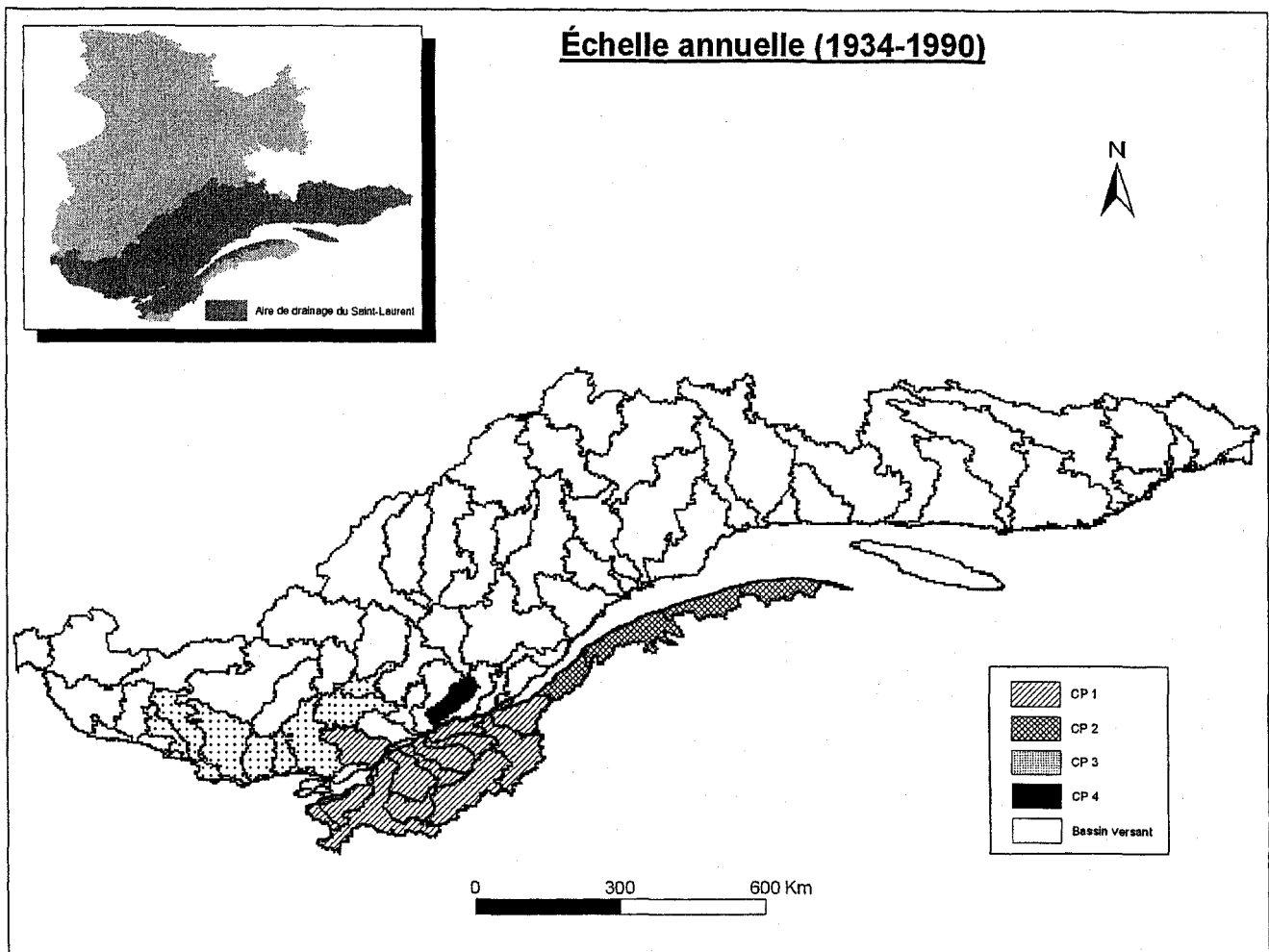


Fig.2 Benseghir et Assani

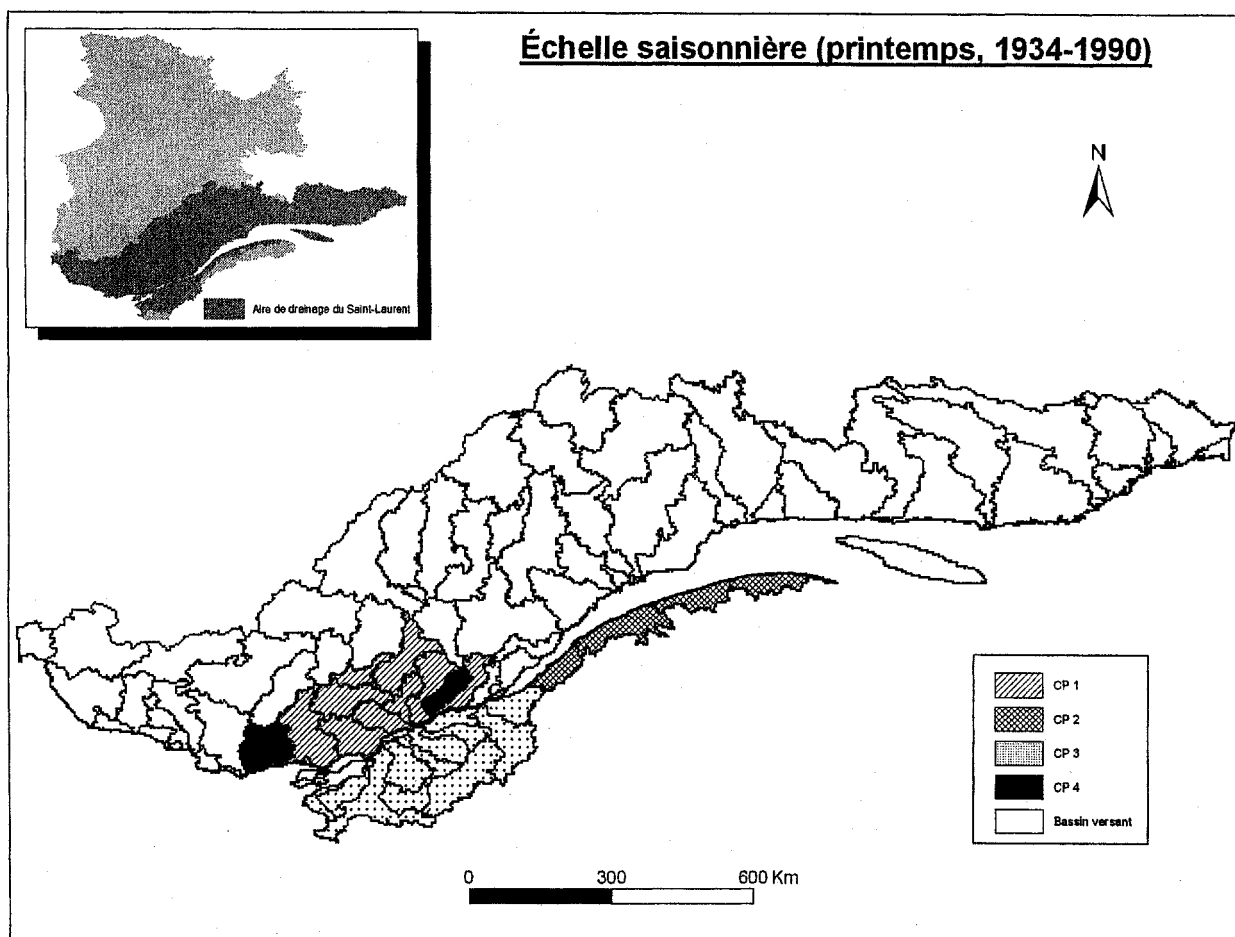


Fig.3 Benseghir et Assani

Liste des tableaux

Tableau 1. Saturations des rivières sur les quatre composantes principales après rotation varimax (1934-1990). Échelle annuelle.

Tableau 2. Saturations des rivières sur les quatre composantes principales après rotation varimax (1934-1990). Échelle annuelle.

Tableau 3. Corrélations croisées entre les trois premières composantes principales et les indices climatiques (1934-1990). Échelle annuelle (printemps).

Tableau 4. Saturation des rivières sur les quatre composantes principales (1934-1990) après rotation varimax. Échelle saisonnière.

Tableau 5. Corrélations croisées entre les trois premières composantes principales et les indices climatiques (1934-1990). Échelle saisonnière (printemps).

DEUXIÈME ARTICLE

ANALYSE SPECTRALE DES DÉBITS DANS LA PARTIE MÉRIDIONALE DU QUÉBEC

Safia **BENSEGHIR*** et Ali A. **ASSANI***

* Laboratoire d'Hydro-climatologie et de Géomorphologie fluviale, section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Adresse de correspondance.

Ali A. ASSANI

Section de Géographie, Pavillon Léon-Provencher, Université du Québec à Trois-Rivières, 3351, Boulevard Des Forges, Trois-Rivières, Québec, G9A 5H7, Canada.

Tél. : (819) 376-5011 ; Fax : 376-5179 ; email : Ali_Assani@uqtr.ca

RÉSUMÉ

Analyse spectrale des débits de rivières dans la partie méridionale du Québec.

Nous avons analysé 17 chroniques des débits annuels et mensuels des rivières situées dans la partie méridionale du Québec sur une période de 54 ans (1934-1990) au moyen de l'analyse spectrale (méthode de maximum d'entropie). Cette analyse a été appliquée aux séries des débits et aux notes factorielles des composantes principales obtenues en regroupant les 17 rivières en trois régions hydrologiques homogènes en fonction de la variabilité inter-annuelle des débits. Quatre modes de fréquences ont été détectés.

- Les Moyennes Basses Fréquences (MBF) dont la période varie de 16 à 17 ans;
- Les Basses Fréquences (BF) caractérisées par une périodicité de 2 à 8 ans;
- Les Hautes fréquences (HF) de périodes comprises entre 6 et 12 mois;
- Enfin, les Très Hautes Fréquences (THF) caractérisées par des périodes comprises en 2 et 5 mois.

Les deux derniers modes ont été détectés sur toutes les rivières analysées. Nous avons associé les basses fréquences aux facteurs astronomiques (marées lunaires, tâches solaires) et climatiques (Oscillation climatiques) alors que les hautes fréquences ont été associées aux précipitations saisonnières qui génèrent les crues.

Spectral analysis of streamflow in Southern Québec

ABSTRACT

17 time series of rivers (1934-1990) in Southern Québec are analysed by means of spectral analysis (Maximum entropy method). This method is applied on monthly and annual time series of discharges as on the loadings of principal components analysis achieved by gathering together these 17 time series in three hydrological homogeneous regions according to inter-annual variability of discharges. Four bands of frequency are detected : the Median Low Frequency (16-17 yrs), the Low Frequencies (2-8yrs), the High Frequencies (6-12 months) and the Very High Frequencies (2-4 months). These two last bands are observed on the all rivers. The lower frequency bands can be associated to astronomical (luni-solar cycle, sunspot activity) and climatic (climatic index) while the high frequency bands are associated to seasonal precipitations.

1. INTRODUCTION

La variabilité inter-annuelle des débits résulte de l'interaction complexe de nombreux facteurs astronomiques, climatiques et locaux dont l'influence ne peut être mise en évidence par la méthode classique des corrélations (Coulibaly et al. 2000; Fleming et al., 2000; Kayser et al., 1990; Pekarova et al., 2003; Piechota et Dracup 1999; Piechota et al. 1998). Pour détecter l'influence de ces différents facteurs, on recourt souvent à d'autres méthodes d'analyse statistique comme l'analyse spectrale ou des ondelettes, les réseaux neuronaux et les méthodes bayésiennes (Lall et Mann 1995; Lall et al. 1996 ; Anctil et Coulibaly 2004).

Au Québec méridional, Anctil et Coulibaly (2004) ont appliqué l'analyse des ondelettes pour détecter les signaux des basses fréquences sur les séries des débits moyens annuels de 18 rivières. Cependant cette analyse effectuée à l'échelle annuelle ne permet pas la détection des signaux de hautes fréquences. Pourtant, comme l'avaient démontré Smith et al. (1998), ces signaux caractérisent mieux les régimes hydrologiques car ils permettent entre autres d'établir un lien entre ceux-ci et la circulation saisonnière des masses d'air dont l'influence ne peut pas être détectée à partir des débits moyens annuels. Ils peuvent ainsi amplifier ou atténuer les effets des facteurs associés aux signaux de basses fréquences sur la variabilité inter-annuelle des débits. Par conséquent, il est aussi important de les déterminer pour mieux cerner tous les facteurs qui influencent cette variabilité. Afin de détecter aussi bien les signaux de hautes que de basses fréquences, nous avons appliqué l'analyse spectrale aux séries annuelles et mensuelles de 17 rivières situées au Québec méridional. De fait, ces

signaux sont généralement associés aux différents facteurs de variabilité inter-annuelle des écoulements. L'identification de ces différents facteurs devient ainsi importante afin d'assurer éventuellement une meilleure gestion et/ou une meilleure prévision des ressources hydriques dans un contexte des changements climatiques.

2. SOURCES DE DONNÉES ET MÉTHODES D'ANALYSE

Le réseau hydrographique du Québec est divisé en trois grands bassins versants (fig.1) : le bassin de Saint-Laurent ($673\,000\text{ km}^2$) ainsi que les bassins des Baies d'Ungava ($518\,000\text{ km}^2$) et d'Hudson ($492\,000\text{ km}^2$). Dans le cadre de cette étude, nous nous limiterons seulement au premier bassin versant puisque les séries hydrologiques sont encore relativement courtes (moins de 30 ans) dans les deux autres bassins versants. Les données des débits analysées ont été extraites du cédérom Hydat édité par Environnement Canada en 2000. Dans le cadre de cette étude, nous avons retenu toutes les stations de rivières dont l'écoulement est naturel ou très faiblement régularisé et pour lesquelles les mesures des débits s'étendaient sur au moins 50 ans. La période d'étude considérée s'étend ainsi de 1934 à 1990. Sur la base de ce critère, nous avons retenu 17 rivières (tableau 1). Notons que 12 de ces 17 rivières ont été déjà analysées par Anctil et Coulibaly (2004).

Il existe plusieurs méthodes d'analyse spectrale qui présentent chacune ses avantages et ses inconvénients (Berger et al. 1991; Yiou et al. 1996). Dans le cadre de cette étude, nous avons utilisé la méthode de maximum d'entropie (ME) après filtrage des données par les moyennes mobiles des séries centrées (Kayser et al. 1990). Par rapport aux autres méthodes d'analyse spectrale, la méthode de maximum d'entropie

présente l'avantage majeur de détecter très rapidement les différents pics spectraux présents dans une chronique des données (Berger et al. 1991). De plus, il possède la propriété de mieux individualiser les pics (netteté des pics) en raison de son excellent pouvoir de résolution des fréquences. Nous avons opté aussi pour cette méthode afin de comparer nos résultats à ceux de Kayser et al (1990). Ces auteurs l'ont utilisée pour analyser les périodicités de 49 fleuves dans le monde. La description mathématique détaillée de cette approche est exposée par Yiou et al. (1996) notamment et son application en hydrologie, par Fleming et al. (2002).

La méthode d'entropie a été d'abord appliquée aux données des débits de chaque rivière, ensuite aux notes factorielles des composantes principales significatives. Ces dernières représentent chacune une région hydrologique homogène. Le regroupement des stations en régions hydrologiques homogènes a été effectuée au moyen des valeurs de saturations sur les composantes significatives (valeurs propres > 1) après rotation d'axes par la méthode varimax.

3. RÉSULTATS

3.1. Analyse Spectrale Des Débits À L'échelle Mensuelle : Détection Des Hautes Fréquences

L'analyse spectrale a été appliquée aux séries mensuelles constituées de douze mois d'une année hydrologique qui commence en octobre et se termine en septembre de l'année civile suivante. Pour chaque rivière, nous avons ainsi analysé 648 données des débits mensuels pour la période 1934-1990. La figure 1 présente un cas des différents pics observés sur ces chroniques. Les pics sont en effet très nets.

Le tableau 2 résume les différentes fréquences détectées. Celles-ci ont été groupées en 6 classes suivantes :

- Les Très Hautes Fréquences (THF) de période comprise entre 5 et 2 mois;
- Les Hautes Fréquences (HF) dont la périodicité oscille entre 6 et 12 mois ;
- Les Basses Fréquences (BF) dont la période varie entre 24 et 120 mois;
- Les Moyennes Basses Fréquences (MBF) caractérisées par des périodes de 120 à 240 mois;
- Enfin, les Très Basses Fréquences (TBF) de période supérieure à 240 mois.

Les deux premières bandes de fréquences sont présentes sur toutes les chroniques des débits. Les deux pics les plus marqués correspondent aux périodes de 6 et 12 mois (bande HF). Quant à la bande de très haute fréquence (THF), les valeurs de densités spectrales diminuent inversement à la période des fréquences. Ainsi, la densité spectrale de la fréquence de période de 4 mois est plus élevée que celle de la fréquence de deux mois. En ce qui concerne les basses fréquences, les pics qui leur sont associées n'émergent qu'à peine en raison de leur faible densité spectrale normalisées qui ne dépasse guère 0,3. Ces bandes ont été détectées seulement sur quatre rivières dont trois en rive nord (Coulonge, Petite Nation et Sainte-Anne) et une seule en rive sud (Richelieu).

En conclusion, à l'échelle mensuelle, l'analyse spectrale a permis de détecter cinq fréquences différentes de périodicité égale ou inférieure à 12 mois sur toutes les rivières analysées mais avec une nette prédominance des fréquences de 6 et 12 mois. Quant aux trois autres fréquences, la valeur de la densité spectrale normalisée décroît avec la période.

3.2. Analyse Spectrale À L'Échelle Annuelle : Les Notes Factorielles

Les basses fréquences sont souvent masquées par les hautes fréquences à l'échelle mensuelle. Nous avons ainsi analysé les débits moyens annuels et saisonniers (printaniers) pour pouvoir mieux les détecter. Contrairement à l'échelle mensuelle, l'analyse spectrale a été appliquée seulement sur 54 données. L'analyse des chroniques des débits de chaque rivière n'a pas donné des résultats intéressants car les pics étaient difficiles à interpréter (fig.2). Nous avons donc procédé par une analyse en composantes principales en fonction de la variabilité inter-annuelle des débits. L'objectif de cette opération est de regrouper les rivières qui sont caractérisées par la même variabilité inter-annuelle des débits. L'opération a été appliquée aux échelles annuelle et saisonnière. À l'échelle saisonnière, comme on ne pouvait pas analyser simultanément tous les douze mois de l'année, nous nous sommes limités seulement aux trois mois (avril à juin) de la saison printanière. Nous avons choisi cette saison du fait que plus de la moitié de l'écoulement annuel survient au printemps au moment de la fonte des neiges (Assani et Tardif 2004).

Les tableaux 3a et 3b présentent le regroupement des rivières en fonction de leurs saturations sur les quatre composantes principales. On peut noter que la relation entre les composantes principales et les rivières varie en fonction de l'échelle d'analyse. À l'échelle annuelle, les deux premières composantes sont associées aux rivières de la rive sud situées respectivement dans les parties méridionale et septentrionale. Quant à la troisième composante, elle est associée aux rivières de la rive nord. A l'échelle

saisonnaire, on observe une interversion entre la première et la troisième composante principales. En effet, la première composante principale représente les rivières de la rive nord et la troisième, les rivières de la rive sud situées dans la partie méridionale.

Ensuite, nous avons appliqué l'analyse spectrale sur les notes factorielles sur les trois premières composantes principales. Nous avons écarté la quatrième composante car elle est associée seulement à une (échelle annuelle) ou deux rivières (échelle saisonnière). De fait, les notes factorielles représentent les valeurs des débits mesurés chaque année dans chaque région hydrologique homogène sur les nouveaux axes (composantes principales). Les figures 3a et 3b présentent les différents pics. On peut remarquer que ceux-ci sont mieux individualisés que sur les données des débits. À l'échelle annuelle, on note la présence des TBF et BF. Mais à l'échelle saisonnière, outre les deux types de fréquences, on observe aussi la présence des moyennes basses fréquences (périodes comprises entre 20 et 10 ans) qui sont présentes sur les trois régions hydrologiques homogènes. Leur période est quasi identique (16 à 17 ans). Il s'ensuit que le fait le plus significatif à retenir est la présence des BF et des TBF sur les trois composantes principales aussi bien à l'échelle annuelle qu'à l'échelle saisonnière. Ces signaux étaient donc masqués à l'échelle mensuelle.

4. DISCUSSION ET CONCLUSION

L'analyse spectrale des débits et des notes factorielles des composantes principales aux échelles annuelle, saisonnière et mensuelle nous a permis de détecter six bandes de fréquences sur les chroniques des débits de 17 rivières situées dans la partie méridionale du Québec.

- Les très faibles basses fréquences dont la les périodes sont supérieures à 20 ans;
- Les moyennes basses fréquences dont les périodes sont comprises entre 10 et 20 ans;
- Les basses fréquences dont les périodes sont inférieures à 10 ans ;
- Les hautes fréquences dont les périodes sont comprises entre 6 et 12 mois;
- Enfin, les très hautes fréquences dont les périodes sont comprises entre 6 et 2 mois.

L'analyse en ondelettes des chroniques des débits moyens annuels de 18 rivières réalisée par Anctil et Coulibaly (2004) dans la partie méridionale du Québec a mis en évidence l'existence des basses fréquences et en particulier les fréquences de périodicité comprise entre 2 et 6 ans. Ces basses fréquences avaient été déjà identifiées sur les chroniques des débits moyens annuels de 49 fleuves répartis à travers le monde au moyen de l'analyse spectrale par la méthode d'entropie (Kayser et al. 1990). Outre ces basses fréquences, Kayser et al. (1990) ont aussi détecté la présence des moyennes basses fréquences (MBF) sur certains fleuves de l'Amérique du nord comme le Saskatchewan, le Niagara et le Missouri. La périodicité de ces fréquences variait entre 12 et 17 ans. Elle est comparable à celle détectée sur les rivières du Québec (16-17 ans). Quant aux très basses fréquences (TBF), elles n'ont pas été détectées en Amérique du nord par ces auteurs. En revanche, elles l'ont été par Pekarova et al. (2003) même sur le fleuve Saint-Laurent (périodicité de 28 ans). Cependant, il convient de rester prudent sur ce résultat du fait que les chroniques des débits que nous avons analysées ne dépassent guère 60 ans. L'existence de ces types de fréquence sur des chroniques des débits de moins de 100 ans est toujours difficile à prouver.

Quant aux signaux de hautes fréquences, ils sont rarement recherchés malgré leur influence prépondérante sur les régimes hydrologiques du fait que de nombreux travaux se limitent souvent à l'analyse des débits moyens annuels. Les deux types de signaux de haute fréquence (HF et THF) que nous avons détectés l'ont été aussi par d'autres auteurs en Amérique du nord (Fleming et al. 2003; Smith et al. 1998). Même si les séries mensuelles des débits au Québec sont largement dominées par les fréquences de 6 et de 12 mois, mais elles recèlent aussi la présence de trois autres fréquences de périodicité de 2, 3 et 4 mois.

Le tableau 5 résume les relations entre les fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques associés. En ce qui concerne les basses fréquences de périodicité comprise entre 2 et 6 ans, elles sont associées à plusieurs facteurs astronomiques et climatiques : les oscillations climatiques (oscillations australe et nord atlantique, oscillation quasi-biennale), l'activité des tâches solaires et les variations de la température globale (Kayser et al., 1990). Quant aux signaux de moyennes basses fréquences, la périodicité associée au cycle des tâches solaires solaire (11 ans) n'a pas été clairement identifiée sur les chroniques des débits analysées. En revanche, celle associée au cycle lune-soleil (marées lunaires) l'a été sur les notes factorielles à l'échelle saisonnière. Cette périodicité a été identifiée sur de nombreuses séries pluviométriques dans le monde (Curie, 1993; Treloar, 2002). Quant aux hautes fréquences, le signal de 12 mois correspond au cycle annuel des débits alors que celui de 6 mois doit être associé sans nul doute au cycle saisonnier des débits lié à la fonte printanière des neiges. La crue printanière est l'événement majeur qui caractérise le régime hydrologique des rivières au Québec. Ce qui explique la densité spectrale très élevée associée à ce signal. Les signaux de très hautes fréquences (THF) sont difficiles

à interpréter comme l'avaient déjà souligné Smith et al. (1998) dans leur étude sur les régimes hydrologiques des rivières des Etats-Unis au moyen de l'analyse des ondelettes. Au Québec, nous sommes persuadés qu'ils sont aussi associés aux régimes saisonniers des débits. Ainsi, le signal de la fréquence de 4 mois correspond aux crues générées par les précipitations automnales provoquées par les activités cyclogéniques d'origine extratropicale (fronts) ou tropicale (le reste des ouragans). Celles-ci surviennent 4 à 5 mois après la crue printanière. Quant aux signaux associés aux périodes de 3 et 2 mois, ils peuvent être associés aux crues provoquées par les précipitations orageuses estivales d'origine convective. Celles-ci surviennent annuellement en été après la fonte des neiges dans la partie méridionale du Québec, c'est-à-dire deux à trois mois après l'occurrence de la crue printanière. Il s'ensuit qu'en fonction de la densité spectrale normalisée, la crue estivale est moins importante que la crue automnale et celle-ci, moins importante que la crue printanière. La mise en évidence de ces trois types de fréquences associés chacun à un type des précipitations constitue sans nul le résultat le plus significatif de cette étude.

Enfin, l'analyse spectrale a permis de détecter de nombreuses fréquences de différentes périodes présentes sur les chroniques des débits au Québec. Les fréquences les plus constantes sont les BF, les HF et THF. Ces deux dernières ont été détectées sur toutes les chroniques des débits à l'échelle mensuelle. La présence de ces nombreuses fréquences traduit en fait l'interaction complexe des facteurs climatiques, astronomiques et locaux sur la variabilité inter-annuelle des débits au Québec. Les effets de ces différents facteurs peuvent se conjuguer ou s'opposer rendant imprévisibles la variabilité inter-annuelle des débits.

REMERCIEMENTS

Nous remercions les professeurs Mesfioui Mhamed et Alain Chalifour de l'UQTR pour leur aide dans l'application de l'analyse spectrale et pour leurs remarques judicieuses lors la préparation du manuscrit. Nos remerciements s'adressent aussi au FIR et au CNRSG pour leur aide financière.

BIBLIOGRAPHIE

- ANCTIL, F. et COULIBALY, P. 2004. Wavelet analysis of the interannual variability in Southern Québec streamflow. *Journal of climate* 17, 163-73.
- ASSANI, A.A. et TARDIF, S. 2004. Classification, caractérisation et facteurs de variabilité spatiale des régimes hydrologiques naturels au Québec. Approche éco-géographique. *Revue des Sciences de l'Eau* (Accepté).
- BERGER, A., MELICE, J.L. et HINNOV, L. 1991. A strategy for frequency spectra of quaternary climate record. *Climate Dynamics* 5, 227-40.
- CURIE, G.R. 1993. Luni-Solar 18.6- and 10-11-year solar cycles signals in South African rainfall. *International Journal of Climatology* 13, 237-256.
- COULIBALY, P., ANCTIL, F., RAMUSSEN, P. et BOBÉE, B. 2000. A recurrent neural networks approach using indices of low-frequency climatic variability to forecast regional annual runoff. *Hydrological Processes* 14, 2755-77.
- FLEMING, S.W., LAVENUE, A.M., ALY, A.H. et ADAMS, A. 2002. Pratical applications of spectral analysis to hydrologic time series. *Hydrological Processes* 16, 565-74.

KAYSER, N., PROBST, J.-L., CADET, D. et TARDY, Y. 1990. Propagation des ondes de sécheresse et d'humidité à travers le monde. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences de Paris* 310, 757-63.

LALL, U. et MANN, M. 1995. The Great Salt Lake : a barometer of low-frequency climatic variability. *Water Resources Research* 31, 2503-15.

LALL, U., SANGOYOMI, T. et ABARBANED, H.D.I. 1996. Nonlinear dynamics of the Great Salt Lake : nonparametric short-term forecasting. *Water Resources Research* 32, 975-85

PEKAROVA, P., MIKLANEK, P. et PEKAR J. 2003. Spatial and temporal runoff oscillations analysis of the main rivers of the world during the 19th-20th centuries. *Journal of hydrology* 274, 62-79.

PIECHOTA, T.C. et DRACUP, J.A. 1999. Long-range streamflow forecasting using El-Nino-Southern Oscillations indicator. *Journal of Hydrologic Engineering* 4, 144-151.

PIECHOTA, T.C., DRACUP, J.A. et FOWELL, R.G. 1997. Western US streamflow and atmospheric circulation patterns during El Nino-Southern Oscillation (ENSO). *Journal of Hydrology* 201, 249-71.

SMITH L.C, TURCOTTE, D.L. et BRYAN, L.I. 1998. Stream flow characterization and features detection using a discrete wavelet transform. *Hydrological Processes* 12, 233-249.

TRELOAR, N.C. 2002. Luni-Solar tidal influences on climate variability. *International Journal of Climatology* 22, 1527-1542.

YIOU, P., BAERT, E. et LOUTRE, M.F. 1996. Spectral analysis of climate data. *Surveys in Geophysics* 17, 619-63.

Tableau 1. Rivières analysées

Rivières	Code fédéral	Superficie (km ²)	Latitude (N)	Longitude (O)	Localisation
Richelieu	02OJ007/7	22000	452354	731532	RS
Nicolet de sud-ouest	02OD001	544	454730	715809	RS
Chateaugay	02QA001/54	2500	451710	734810	RS
Beaurivage	02PJ007	709	463933	711719	RS
Sud	02PH001/10	826	464914	704525	RS
Matane	02QB001	1650	484629	673231	RS
Blanche	02QB003/5	208	484603	673957	RS
Rimouski	02QA010/02	1610	482448	683322	RS
Trois-Pistoles	02QA001	932	480521	691147	RS
Loup	02PG010/01	1050	474922	693110	RS
Coulonge	02KG001	5150	455226	764109	RN
Petite Nation	02LD002/5	1330	454730	750529	RN
Matawin	02NF003	1390	464109	735451	RN
L'Assomption	02OB002/1	1340	460044	732547	RN
Vermillon	02ND001	2670	464225	720500	RN
Sainte-Anne	02PB002	1800	473920	725746	RN
Jacques Cartier	02PC002	2010	465326	713138	RN

RS = Rive sud ; RN = Rive nord

Tableau 2. Périodes (mois) des différentes fréquences détectées à l'échelle mensuelle

Rivières	TBF	MBF	BF	HF	THF
Richelieu		217		12 et 6	4, 3 et 2
Nicolet de sud-ouest				12 et 6	4, 3 et 2
Chateaugay				12 et 6	4, 3 et 2
Beaurivage				12 et 6	4, 3 et 2
Sud				12 et 6	4, 3 et 2
Matane				12 et 6	4, 3 et 2
Blanche				12 et 6	4, 3 et 2
Rimouski				12 et 6	4, 3 et 2
Trois-Pistoles				12 et 6	4, 3 et 2
Loup				12 et 6	4, 3 et 2
Coulonge			53 et 21	12 et 6	4, 3 et 2
Petite Nation	435			12 et 6	4, 3 et 2
Matawin				12 et 6	4, 3 et 2
L'Assomption				12 et 6	4, 3 et 2
Vermillon				12 et 6	4, 3 et 2
Sainte-Anne	427			12 et 6	4, 3 et 2
Jacques Cartier				12 et 6	4, 3 et 2

Tableau 3. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990). Échelle annuelle.

Rivières	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.872	0.127	0.134	-0.177
Nicolet de sud-ouest	0.845	0.105	0.182	0.249
Chateaugay	0.841	0.215	0.069	-0.106
Beaurivage	0.835	0.279	0.295	0.097
Sud	0.784	0.329	0.215	0.097
L'Assomption	0.759	0.226	0.420	0.184
Matane	0.232	0.862	0.06	-0.001
Blanche	-0.169	0.850	-0.048	0.067
Rimouski	0.216	0.847	0.155	0.105
Trois-Pistoles	0.264	0.847	0.259	0.167
Loup	0.409	0.695	0.249	0.178
Coulonge	0.000	0.103	0.722	0.316
Petite Nation	0.393	0.144	0.713	-0.226
Matawin	0.328	0.325	0.676	-0.071
Vermillon	0.485	-0.009	0.669	0.026
Sainte-Anne	0.133	0.282	0.040	0.866
Jacques Cartier	0.423	0.367	0.145	-0.044
Valeurs propres	5.193	3.928	2.521	1.169
Variance totale expliquée cumulée (%)	30.5	58.7	72.6	83.7

Tableau 4. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990). Échelle saisonnière (printemps).

Rivière	CPI	CPII	CPIII	CPIV
Richelieu	0.403	0.230	0.738	0.03
Nicolet de sud-ouest	0.148	0.085	0.863	0.197
Chateaugay	0.146	0.043	0.893	0.074
Beaurivage	0.331	0.272	0.792	0.169
Sud	0.350	0.420	0.725	0.132
L'Assomption	0.698	0.135	0.481	0.343
Matane	0.203	0.884	0.138	-0.107
Blanche	-0.169	0.845	0.021	0.316
Rimouski	0.209	0.845	0.119	0.034
Trois-Pistoles	0.252	0.808	0.303	0.155
Loup	0.461	0.633	0.374	0.159
Coulonge	0.534	0.042	0.045	0.633
Petite Nation	0.798	0.193	0.325	-0.083
Matawin	0.742	0.351	0.299	0.290
Vermillon	0.924	0.07	0.125	-0.125
Sainte-Anne	-0.058	0.233	0.382	0.773
Jacques Cartier	0.791	0.158	0.279	0.205
Valeurs propres	4.242	3.841	4.173	1.517
Variance totale expliquée cumulée (%)	25.0	47.6	72.1	81

Tableau 5. Périodes (ans) des différentes fréquences détectées sur les composantes principales (CP).

Composantes Principales	TBF	MBF	BF
Échelle annuelle			
CP I	37		9, 4 et 3
CP II	26		4.5, 3.6, 3, 2.5 et 2
CP III	33		7, 5, 3 et 2
Échelle saisonnière (printemps)			
CP I	57	17	2
CP II	26	16	7, 5 et 4
CP III	32	17	10, 4, 3 et 2

Tableau 6. Relation entre fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques associés.

Modes de Fréquences	Bandes de fréquences	Facteurs associés
LES FRÉQUENCES	Très Basses Fréquences (> 20 ans)	?
	Moyennes Basses Fréquences (10-20 ans)	Cycle Lune-Soleil (17-20 ans)
		Cycle solaire (10-12 ans)
	Basses Fréquences (2-10 ans)	Oscillations climatiques (2-6ans)
		Cycle solaire (3-5ans)
	Haute Fréquence de 12 mois	Cycle annuel des débits
LES FRÉQUENCES	HAUTES Haute Fréquence de 6 mois	Crues printanières (fonte des neiges)
	Très Haute Fréquence de 4 mois	Crues automnales (pluies frontales)
	Très Hautes Fréquences de 2-3 mois	Crues estivales (pluies orageuses)

Liste des tableaux

Tableau 1. Rivières analysées

Tableau 2. Périodes (mois) des différentes fréquences détectées à l'échelle mensuelle.

Tableau 3. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990).

Tableau 4. Saturations des rivières sur les quatre premières composantes principales (1934-1990).

Tableau 5. Périodes (ans) des différentes fréquences détectées sur les trois premières composantes principales (échelles annuelle et printanière).

Tableau 6. Relation entre fréquences de différentes périodicités et les facteurs climatiques.

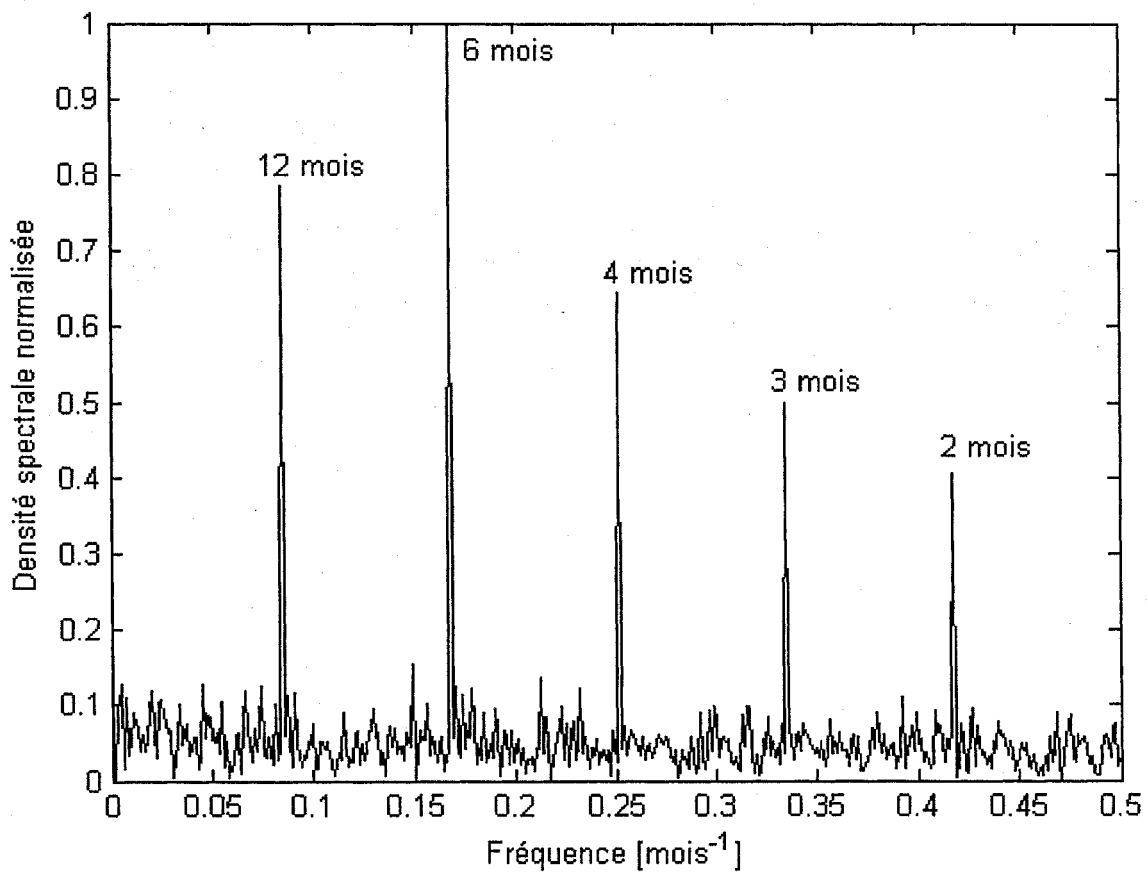
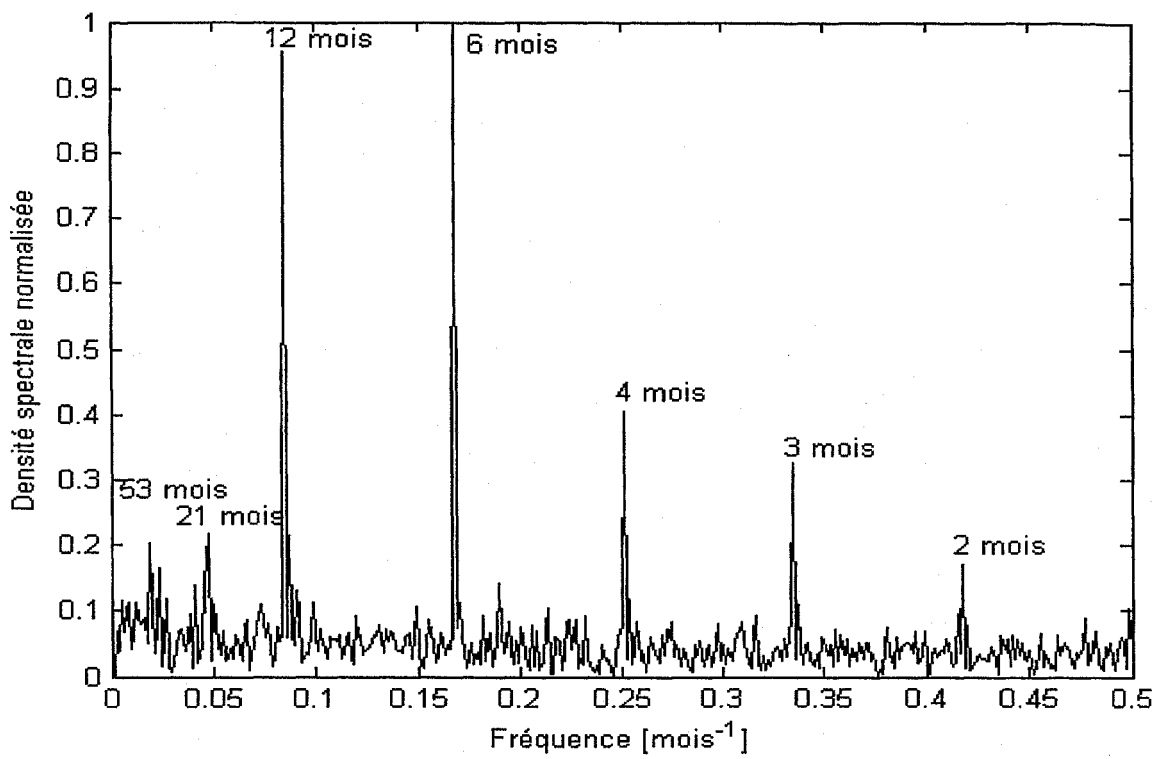


Fig.1. Benseghir et Assani

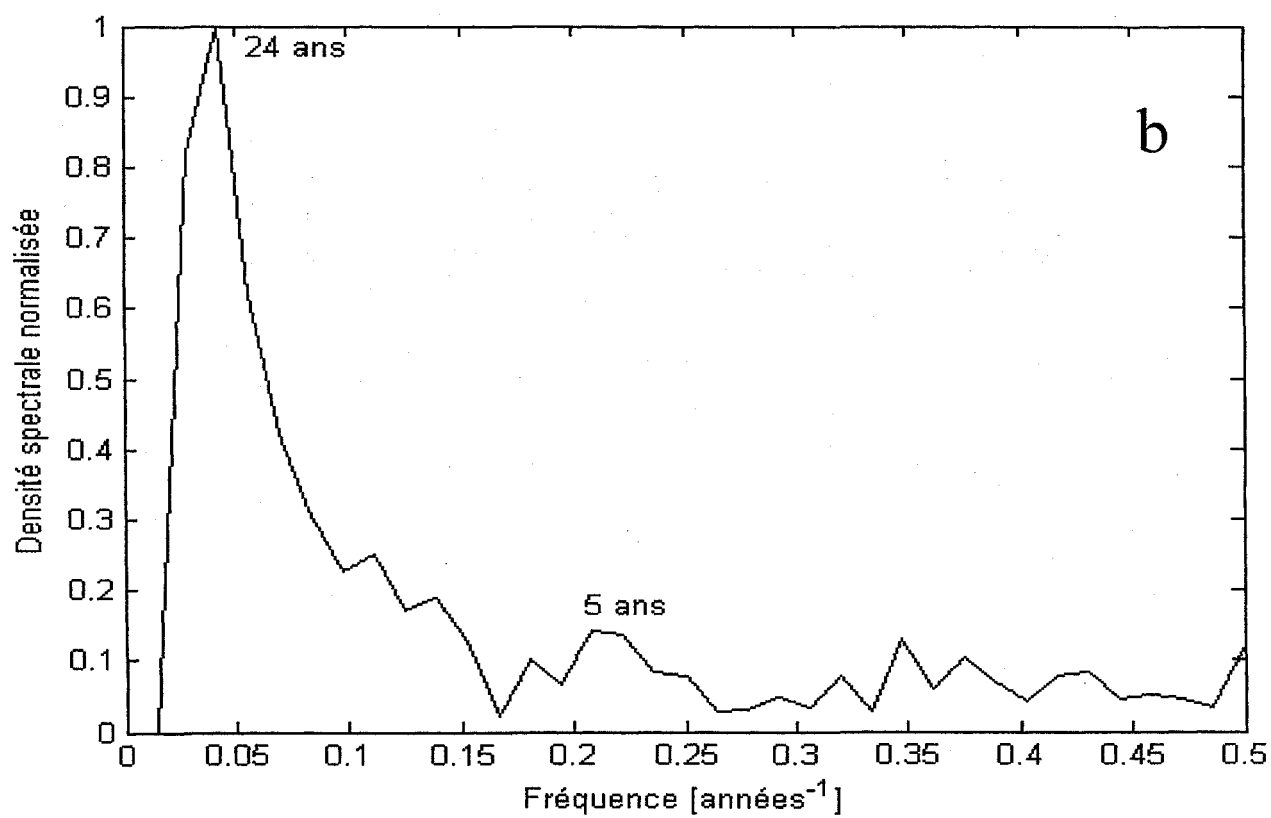
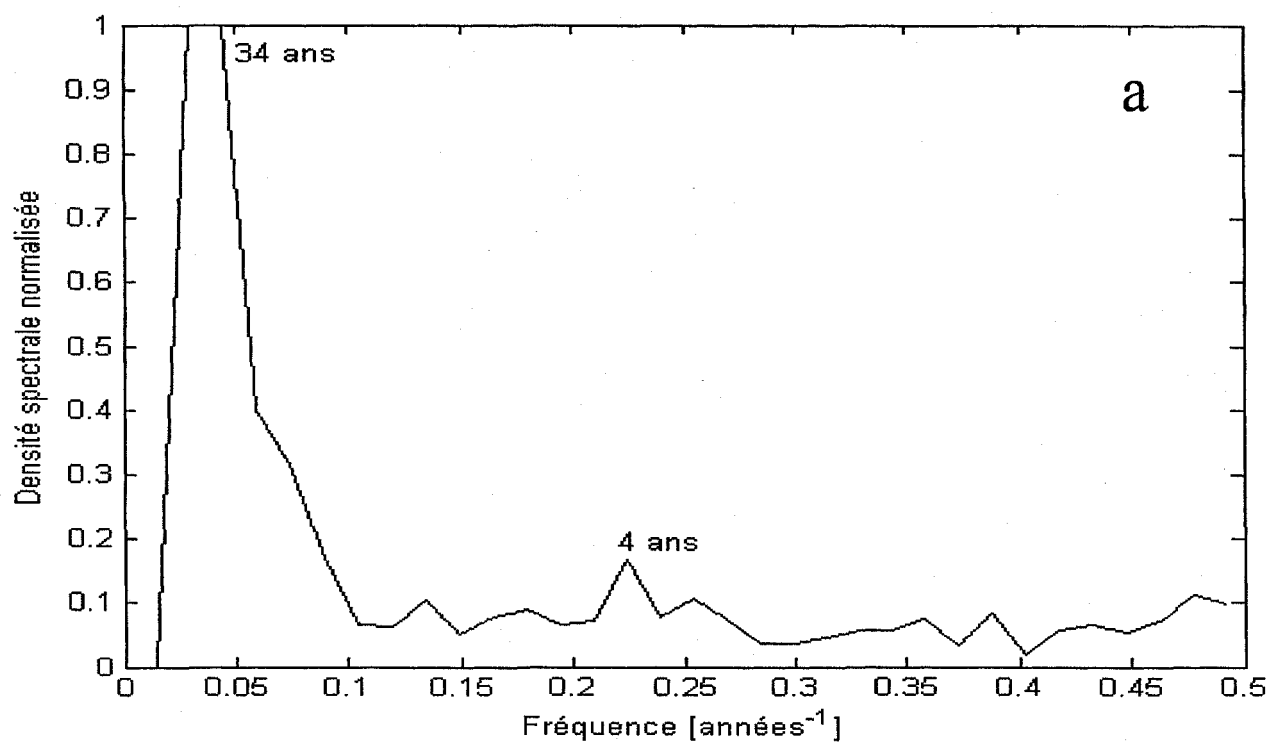


Fig.2 Benseghir et Assani

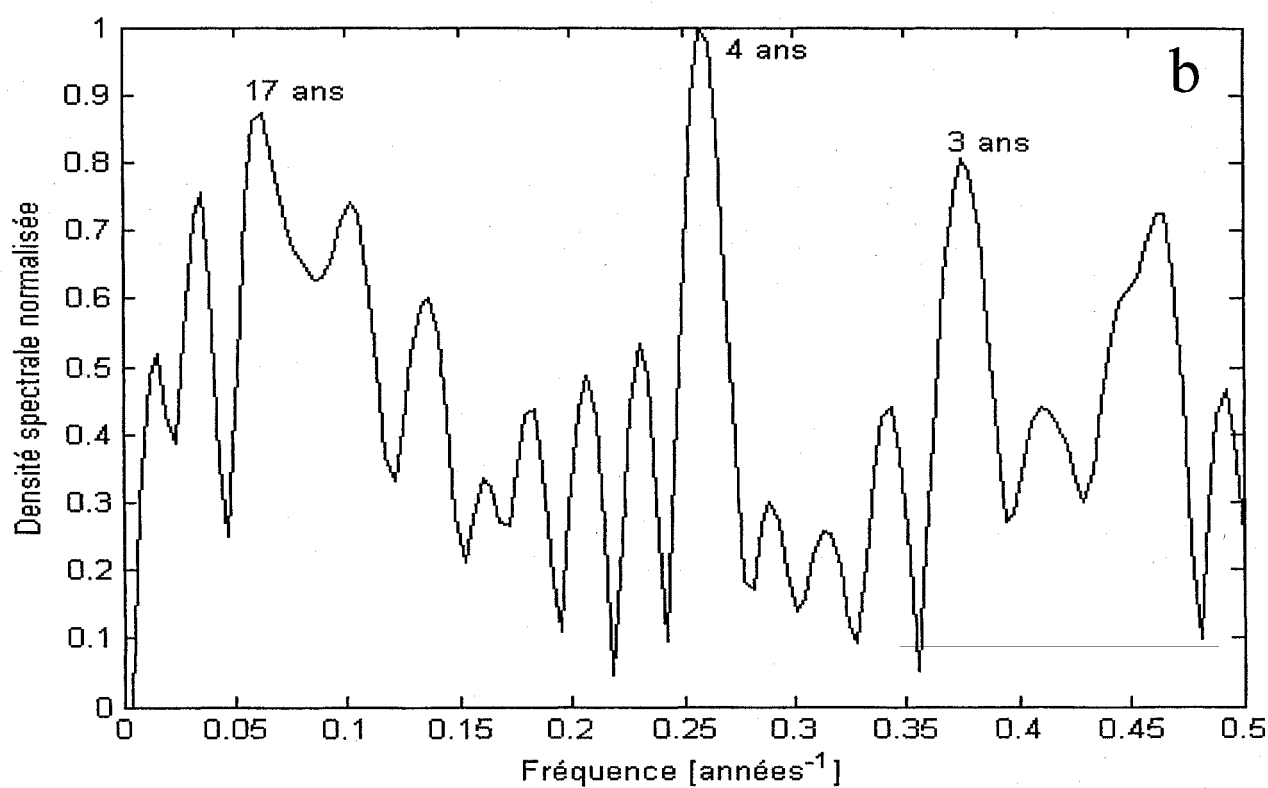
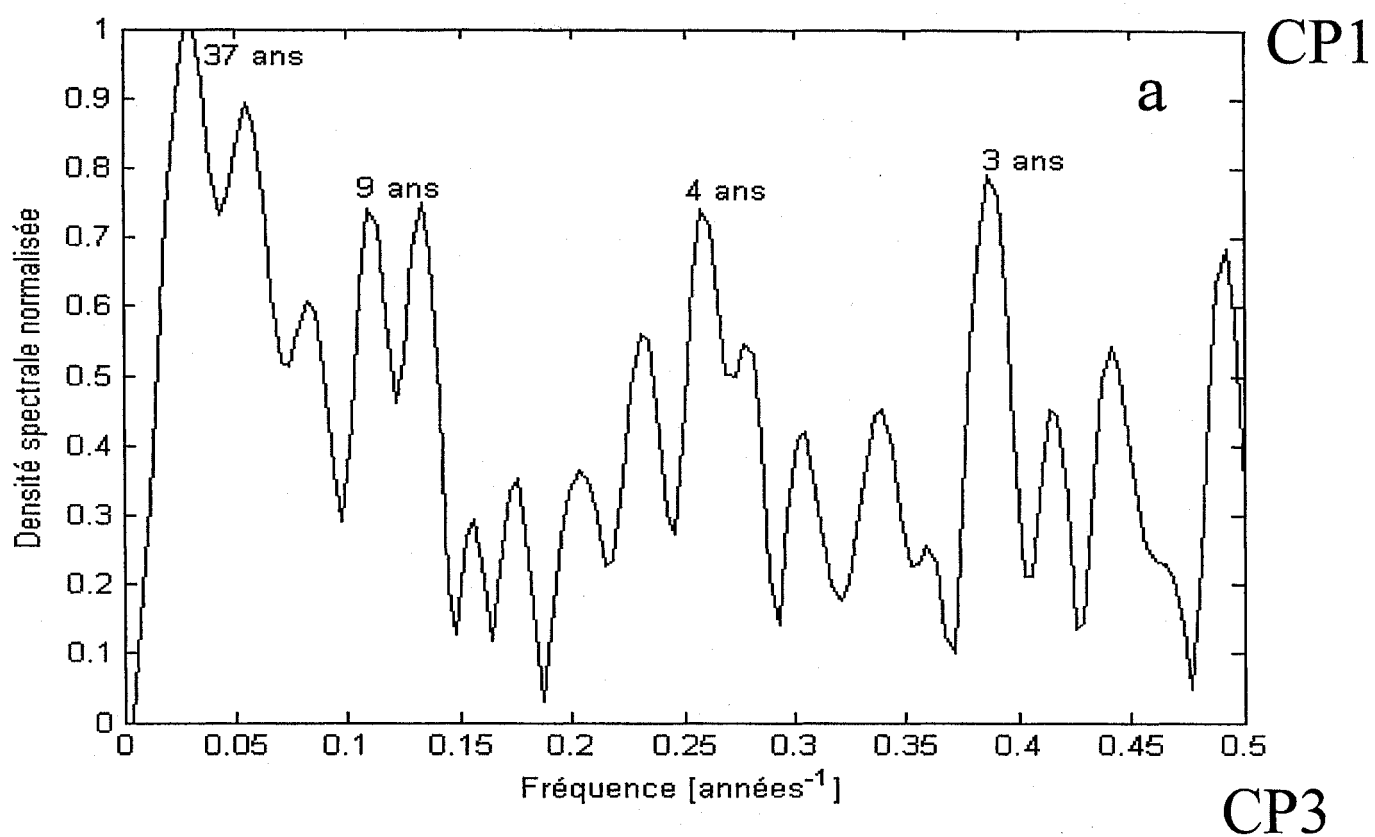


Fig.3. Benseghir et Assani

Liste des figures

Fig.1. Exemple de densité spectrale normalisée des débits mensuels. a : Rivière Coulonge (Rive nord); b : Rivière Beaurivage (rive sud).

Fig.2. Exemple de densité spectrale normalisée des débits moyens annuels. a : Rivière Coulonge (Rive nord); b : Rivière Beaurivage (rive sud).

Fig.3. Exemple de densité spectrale normalisée des notes factorielles. a : échelle annuelle (CPI); b : échelle printanière (CPIII).